P. Smirnov, E.Mouravine,
V. Storojenko, N.Rakipov

L'AGROCHIMIE

Éditions Mir Moscou

П. Смирнов

Э. Муравин

АГРОХИМИЯ

Издательство «Колос», 1977
Москва

P. SMIRNOV
E. MOURAVINE
V. STOROJENKO
N. RAKIPOV

l'agrochimie

ÉDITIONS MIR
MOSCOU

Traduit du russe
par
E. Borissova

На французском языке

© Издательство «Колос», 1977
© Traduction française Éditions Mir 1981

INTRODUCTION

LES TÂCHES ET LES MÉTHODES DE L'AGROCHIMIE

L'agrochimie étudie le cycle des substances nutritives en agriculture, les dépendances entre la plante, le sol et les engrais, ainsi que la façon de diriger l'alimentation des plantes cultivées en vue d'augmenter leur rendement et d'améliorer les qualités de la récolte.

Le principal moyen d'intervention de l'homme dans ce cycle est l'utilisation d'engrais.

L'apport d'engrais minéraux permet d'introduire en agriculture, dans le cycle des substances, de nouvelles quantités d'éléments nutritifs ; l'apport de fumier et d'autres résidus de la culture des plantes et de l'élevage, de récupérer une partie des substances nutritives ayant déjà fait partie des précédentes récoltes. Il en résulte qu'il est possible de restituer les substances nutritives exportées par les moissons et leurs pertes non productives à partir du sol même (érosion hydraulique et éolienne, lessivage, évaporation dans l'atmosphère, etc.) et, ainsi, non seulement d'entretenir, mais encore d'améliorer la fertilité des sols.

Le but essentiel de toute fumure est de régulariser le cycle des substances nutritives en agriculture et d'améliorer l'alimentation des plantes.

« Finalement, écrivait K. Timiriazev, toutes les tâches de l'agriculture se ramènent à assurer le plus rigoureusement possible la nutrition des plantes ». L'étude de la nutrition des plantes a toujours été une des tâches principales de l'agrochimie. Elle étudie aussi le métabolisme végétal suivant les conditions d'alimentation, car le caractère de cette dernière détermine, non seulement la quantité, mais aussi la qualité de la récolte. L'étude de ces questions rattache l'agrochimie à la physiologie et à la biochimie des plantes. Mais, en outre, l'agrochimie a pour tâche d'étudier et de mettre au point les moyens les plus efficaces de diriger l'alimentation et le métabolisme des plantes par un apport d'engrais, afin d'augmenter la récolte et d'en améliorer la qualité.

Donc, en agrochimie, le premier objet à étudier, c'est la plante.

Quand on examine l'alimentation des plantes et qu'on met au point les procédés pour la diriger au moyen d'engrais, on doit tenir compte également des particularités de la biologie et de l'agrotech-

nique des différentes cultures. Ici se dessinent donc les rapports entre l'agrochimie et la culture des plantes.

Un autre objet des recherches d'agrochimie est le sol. L'étude de la teneur du sol en substances nutritives, de leur dynamique, de leur assimilabilité, des divers processus de transformation des engrais dans le sol, de leur effet sur ses propriétés est un important chapitre de l'agrochimie, sur ce plan, elle a des rapports avec la pédologie et la microbiologie du sol.

Enfin, le troisième objet de l'agrochimie, ce sont les engrais mêmes; en étudiant leur composition, leurs propriétés, leur efficacité, l'agrochimie se met en rapport, non seulement avec la production agricole, mais aussi avec la production chimique, car l'appréciation des nouvelles formes et variétés d'engrais produits par elle, l'établissement des commandes de livraison sont du ressort de l'agrochimie. Les trois principaux objets étudiés en agrochimie : les plantes, le sol, les engrais forment une association dialectique et interagissent réciproquement.

« L'étude des rapports entre la plante, le sol, les engrais, écrivait D. Prianichnikov, a toujours été la tâche essentielle des agrochimistes »; de plus, il soulignait que seule l'agrochimie, dans le but de diriger l'alimentation des plantes par la fumure, afin d'améliorer la fertilité du sol et le rendement des cultures agricoles, synthétise les connaissances sur ces trois facteurs d'action réciproque. C'est ce qui la distingue des autres sciences connexes. D. Prianichnikov a figuré par un triangle, dont les trois sommets représentent la plante, le sol, les engrais et les flèches doubles, l'influence réciproque de chacun de ces objets sur les autres (fig. 1), le système dialectique des dépendances étudiées par l'agrochimie.

L'étude de la nutrition des plantes et de l'interaction entre la plante, le sol et les engrais constitue la base théorique de l'agrochimie. Cette science permet de résoudre activement bon nombre de questions pratiques de l'utilisation des engrais. Ceci concerne les formes, les doses et les proportions d'engrais les plus efficaces, les délais et les procédés les plus rationnels pour leur apport aux différentes cultures sur des divers sols, une adaptation correcte de la fumure au système de travail du sol, à l'assolement, l'irrigation et autres procédés agrotechniques. L'agrochimie est étroitement liée à l'agriculture générale et à la bonification des terres, ainsi qu'à l'économie et à l'organisation de la production agricole, car tous les procédés de fumure sont déterminés par l'agrotechnique et doivent être appréciés du point de vue de leur efficacité économique et toutes les mesures d'utilisation des engrais doivent figurer dans le plan économique et d'organisation général de l'exploitation.

En agrochimie, pour étudier les questions théoriques et pratiques, on utilise diverses méthodes : 1) analyses en laboratoires (chimiques et physico-chimiques) de la plante, du sol et de l'engrais; 2) expériences en pots sur les plantes (en serres et en maisonnettes destinées aux expériences en pots); 3) expériences en plein

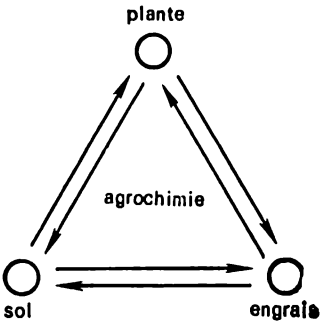


Fig.1. Schéma des liaisons entre les plantes, le sol et l'engrais

champ avec engrais dans les diverses zones pédoclimatiques; 4) expériences de production sur grande étendue dans les kolkhozes et les sovkhozes avec appréciation de l'efficacité économique des résultats obtenus.

Dans la pratique de l'agriculture, l'agrochimie trouve principalement son application pour utiliser efficacement les différents engrais locaux et les résidus industriels.

L'agrochimie est la base scientifique de l'emploi généralisé des procédés chimiques dans l'agriculture; tout comme la mécanisation complexe et la bonification des terres, celui-ci détermine le progrès scientifique et technique en agriculture, et est donc une des principales voies d'intensification, d'augmentation de la productivité agricole.

BREF APERÇU HISTORIQUE SUR LE DÉVELOPPEMENT DE L'AGROCHIMIE

Le développement de l'agrochimie est inséparablement lié au développement de nos connaissances sur la nutrition des plantes.

Bien avant la mise au point de la théorie moderne de l'alimentation des plantes, les agriculteurs utilisaient le fumier, la cendre, la chaux et autres engrais locaux, sans tout de même pouvoir expliquer théoriquement l'action bénéfique des engrais, ce qui barrait la route à l'extension de leur emploi.

Les premières données scientifiques obtenues concernaient l'alimentation aérienne des plantes. A la fin du XVIIIe siècle Priestley, Inhenhous et Sénobier ont montré expérimentalement qu'à la lumière les feuilles vertes des plantes assimilent le dioxyde de carbone de l'air (CO_2) et en dégagent l'oxygène en retenant le carbone, utilisé pour la formation des tissus végétaux.

C'est ainsi que fut découverte la photosynthèse des plantes.

En ce qui concerne l'alimentation des plantes par la racine, des idées fausses ont longtemps régné à ce sujet, même après la découverte de la photosynthèse.

Elles ont trouvé une vive expression dans la théorie humique de l'alimentation des plantes proposée en 1761 par un savant suédois,

Valerius. Mais c'est le savant allemand Thaer qui, dans le premier quart du XIXe siècle, a surtout contribué à sa diffusion. Thaer estimait que l'humus est la seule source d'alimentation des plantes, tandis que les substances minérales ne font que le rendre mieux assimilable.

A cette époque déjà, certains savants réfutaient la théorie humique de Thaer sur l'alimentation des plantes. Ainsi, le savant français Boussingault développa la théorie nitrique de l'alimentation végétale et des engrais. Il révéla le rôle primordial de l'azote en agriculture et montra, par des expériences précises en plein champ, que les légumineuses dans les assolements améliorent la balance azotée et augmentent considérablement le rendement des autres cultures.

Néanmoins, la doctrine de Thaer régna jusqu'aux années 40 du XIXe siècle.

Un revirement dans les vues sur l'alimentation des plantes s'est produit en 1840 lorsque un chimiste allemand, Liebig, fit, dans son livre « La chimie appliquée à l'agriculture et à la physiologie », une critique impitoyable de la théorie de l'humus et la ruina définitivement en formulant la théorie de l'alimentation minérale des plantes. Liebig expliqua pourquoi le sol s'épuise lorsqu'on cultive périodiquement une même culture et avança une théorie de la fertilisation fondée sur la restitution au sol des éléments nutritifs. Il jugeait nécessaire avant tout de rendre au sol les éléments qui en sont exportés en plus grande quantité, c'est-à-dire ceux du premier minimum. Cette règle a été appelée la loi du minimum.

Liebig estimait que parmi tous les éléments assimilés par les plantes, c'est en premier lieu le phosphore qu'il faut rendre au sol, car c'est précisément cette substance que les céréales prélèvent en plus grande quantité. Il sous-estimait l'importance de l'azote pour la fumure et croyait à tort que l'ammoniac pénétrant de l'atmosphère dans le sol avec les précipitations suffisait amplement aux végétaux. C'est pourquoi l'engrais sans azote proposé par lui s'est montré inefficace. Une autre idée de Liebig s'est également révélée fausse : celle de remplacer le fumier par sa cendre. Bientôt, en 1843, Loos, fondateur de la station expérimentale de Rothamsted (Angleterre) a renversé ces idées erronées par des expériences en plein champ. Il fut démontré que, pour augmenter les récoltes, les engrais doivent, outre les éléments minéraux, contenir de l'azote. Au milieu du XIXe siècle, en Europe et en Amérique, on commença à utiliser comme engrais les nitrates du Chili (nitrates de sodium) ; l'effet a été remarquable. Ceci confirmait les vues de Boussingault qui, le premier, avait insisté sur l'importance primordiale de l'azote pour l'alimentation des plantes. On ne saurait considérer comme un absolu l'exigence de Liebig de restituer entièrement au sol tous les éléments nutritifs ; on sait aujourd'hui que la restitution complète de toutes les substances n'est pas indispensable. Cependant, l'idée de la nécessité de rendre au sol les éléments nutritifs prélevés par les plantes est, indubitablement, juste.

K. Timiriazev écrivait : « La doctrine de la nécessité de la restitution représente, de quelque façon qu'on ne cherche à en diminuer l'importance, une des plus grandes acquisitions de la science. »

Liebig a, le premier, exprimé nettement l'idée de la nécessité d'une régulation du cycle des éléments dans l'agriculture, car sa perturbation entraîne une baisse de la fertilité du sol.

K. Marx a hautement apprécié cette thèse de Liebig : « Un des mérites immortels de Liebig est d'avoir élucidé l'aspect négatif de l'agriculture actuelle, c'est-à-dire capitaliste, du point de vue des sciences de la nature ».

Bien que quelques-uns des principes de Liebig soient erronés, ses travaux ont éveillé l'intérêt pour le problème de la nutrition des plantes et de l'utilisation des engrais et ont stimulé le développement des recherches dans ce domaine. Dans de nombreux pays ont été créées des stations agrochimiques expérimentales qui ont fortement contribué au développement de l'agrochimie et à l'utilisation des engrais en pratique agricole.

Des expériences de culture des plantes en milieux artificiels, stériles, eau ou sable, ont été d'une grande importance pour la théorie de la nutrition des plantes. Dans les années 50 du XIXe siècle, certains savants (Knop, Sacks et autres) ont obtenu, en milieu artificiel, une croissance normale des plantes en y ajoutant les substances nutritives requises et ont établi exactement quels éléments, en quelles quantités et en quelles proportions sont nécessaires à la nutrition des plantes. Les recherches de Hellriegel sur les particularités de la nutrition azotée des légumineuses ont joué également un grand rôle. Ces recherches ont montré que les légumineuses sont capables, au moyen des bactéries des nodosités de leurs racines, de fixer l'azote atmosphérique et d'en enrichir le sol.

En même temps que se développait la théorie de la nutrition des plantes, les engrais entraient dans la pratique agricole. Au milieu du XIXe siècle on commençait déjà à employer, en Europe occidentale, les superphosphates et les nitrates du Chili et, plus tard (1865) à utiliser les engrais potassiques extraits des gisements naturels de sels de potassium de Stassfurt (Allemagne).

Il revient aussi aux savants russes bien du mérite dans le développement de l'agrochimie. C'est de la fin du XVIIIe et du début du XIXe siècle que date, en Russie, l'étude de la nutrition des plantes et l'emploi des engrais. Les représentants les plus renommés de l'agrochimie de cette époque, I. Komov et A. Bolotov, accordaient une grande attention à l'emploi du fumier, des composts, de la cendre, de la chaux et d'autres engrais pour le rétablissement de la fertilité du sol. Ils préconisaient la nécessité de procéder à des expériences sur les engrais.

Bien avant Liebig, au début du XIXe siècle, A. Bolotov et A. Pochman ont insisté sur l'importance, pour la nutrition des plantes, des sels minéraux formés dans le sol par suite de la décomposition du fumier.

Depuis les années 60-70 du XIXe siècle, on se livre, en Russie, à des recherches systématiques dans le domaine de la nutrition des plantes et de l'utilisation des engrais. Sont surtout à mentionner les travaux de A. Enguelgardt, D. Mendéléev, P. Kostychev, K. Timiriazev. Le professeur A. Enguelgardt, l'auteur de « Lettres de la campagne » et des « Principes chimiques de l'agriculture », ouvrages largement connus, a été un des propagandistes passionnés de l'utilisation des engrais minéraux, du fumier, de la chaux, des engrais verts. Le premier en Russie, il a démontré la haute efficacité des phosphates naturels moulus sur les podzols et mis au point les principes de leur emploi.

D. Mendéléev a beaucoup contribué au développement de l'agrochimie. Sous sa direction ont été effectuées les premières expériences pratiques sur les engrais minéraux en différentes régions. D. Mendéléev estimait qu'ils sont un puissant moyen d'accroître les récoltes.

Les recherches classiques de Timiriazev sur la photosynthèse et la nutrition minérale des plantes, les méthodes implantées par lui d'essais en pots ont beaucoup contribué à poser les fondements scientifiques de l'agrochimie.

Le développement ultérieur de l'agrochimie est rattaché au nom de D. Prianichnikov et de ses nombreux élèves. C'est après la Grande Révolution Socialiste d'Octobre que l'activité scientifique de Prianichnikov a pris le plus d'ampleur. On lui doit plus de 400 publications, certains de ses travaux ont connu une notoriété mondiale. Ses travaux classiques sur la nutrition azotée des plantes et l'usage des engrais azotés ont joué un rôle particulièrement important.

Fig. 2. L'Académicien D. Prianichnikov (1856-1948)

Grâce aux travaux féconds de D. Prianichnikov et de l'école agrochimique soviétique créée par lui, l'agrochimie s'est développée en U.R.S.S. sur un large pied physiologique et biochimique, en liaison étroite avec les tâches pratiques de l'application de la chimie à l'agriculture (fig. 2). Les travaux de D. Prianichnikov, P. Kossovitch, K. Guédroïtz, A. Lébédiantsev, S. Sabinine et de nombreux autres savants soviétiques ont permis de résoudre beaucoup de problèmes d'agrochimie. La Révolution d'Octobre, a créé toutes les conditions nécessaires au développement de l'agrochimie et ses acquis scientifiques ont été largement mis en pratique. En 1918 a été organisé un institut spécial de recherche sur les engrais, et en 1931, l'Institut national de recherche sur les engrais, l'agrotechnique et l'agropédologie. Des sections d'agrochimie ont été fondées dans les instituts de recherche de régions et de branches industrielles et dans

les stations expérimentales, des chaires d'agrochimie dans les écoles supérieures agricoles. Depuis les années 20-30, des expériences sont effectuées sur différentes cultures dans diverses régions du pays pour étudier l'efficacité des engrais, des doses et des procédés de fumure. Ces expériences ont démontré le grand effet exercé par les engrais dans de nombreuses régions et ont créé les fondements scientifiques d'une industrie des engrais, de leur large utilisation en agriculture.

C'est au cours des 15 dernières années que les recherches agrochimiques ont pris en Union Soviétique le plus d'ampleur. De nouveaux instituts de recherche ont été fondés, l'Institut central de service agrochimique, l'Institut d'agrochimie et de pédologie de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S., l'Institut de l'emploi généralisé des procédés chimiques en agriculture de la section sibérienne de l'Académie agricole de l'U.R.S.S. En 1964 on a fondé un service agrochimique d'Etat, organisé plus de 200 grands laboratoires agrochimiques de zones qui, sous la direction méthodique de l'Institut central de service agrochimique se livrent à des expériences en champ sur les engrais, à des analyses de masse des sols, des engrais et fourrages, dressent les cartes agrochimiques et fournissent des recommandations pratiques aux exploitations pour l'utilisation efficace des engrais.

De vastes recherches agrochimiques servent de base scientifique à l'implantation de la chimie dans l'agriculture, à une application correcte et efficace de quantités toujours croissantes d'engrais organiques et minéraux.

LES ENGRAIS, LEUR PRODUCTION ET LEUR EMPLOI DANS L'AGRICULTURE SOVIÉTIQUE

Les procédés chimiques jouent un rôle primordial dans l'augmentation du rendement des cultures agricoles, c'est le moyen le plus efficace du point de vue économique d'intensifier l'agriculture.

La production mondiale des engrais minéraux augmente sans cesse. La croissance de la consommation mondiale des engrais minéraux (en millions de tonnes de substances nutritives) est caractérisée par les données suivantes:

Années	1912/13	1937/38	1957/58	1963/64	1969/70	1973/74	1976/77
Consommation de NPK	3,9	9,1	23,8	36,3	62,8	82,0	95,0

Au cours de la période de 1937-38 à 1976-77 la consommation mondiale d'engrais minéraux a plus que décuplé: de 9,1 à 95 millions de tonnes d'éléments fertilisants. Cependant, leur quantité moyenne par hectare de labours et, surtout, par hectare de domaine agricole reste insuffisante, soit respectivement 64 et 21 kg de NPK (tableau 1).

La quantité générale d'engrais minéraux est très irrégulièrement répartie entre les divers pays et continents. Bien que représentant 70 % de la population et 60 % de la superficie des labours de tout

le globe, les Etats d'Asie, d'Afrique, d'Amérique du Sud consomment moins de 25 % des engrais minéraux du monde entier.

Ces pays n'utilisent en moyenne qu'une quantité minime d'engrais minéraux par hectare de labours et de domaine agricole soit respectivement de 13 à 36 et de 3 à 17 kg de N, P, K. Beaucoup de

Tableau 1

Continents et pays	Consommation totale, en mln. de tonnes				Consommation, en kg/ha labours			
	N	P_2O_5	K_2O	Total	N	P_2O_5	K_2O	Total
Monde entier	45,1	26,5	23,1	94,7	30/10	18/6	16/5	64/21
y compris:								
Europe (sans U.R.S.S.)	12,5	8,4	8,2	29,1	88/54	59/37	58/36	205/127
U.R.S.S.	7,3	4,1	5,6	17,0	31/12	18/7	24/9	73/28
Amérique du Nord et centrale	11,6	6,0	5,8	23,4	43/19	22/10	21/9	86/38
Amérique du Sud	0,9	1,5	0,8	3,2	9/2	14/3	8/1	31/6
Asie	11,2	4,5	2,0	17,7	23/11	9/4	4/2	36/17
Afrique	1,4	0,9	0,4	2,7	7/1,4	4/1,0	2/0,3	13/2,7
Australie et Océanie	0,2	1,1	0,3	1,6	5/0,5	25/2,2	5/2,2	35/3,2

ces pays sont donc caractérisés par de basses récoltes et une pénurie de vivres. Il en est tout à fait autrement pour les pays d'Europe (en moyenne respectivement 205 et 127 kg de NPK), ainsi que d'Amérique du Nord (86 et 38 kg) et en U.R.S.S. (73 et 28 kg).

L'emploi de quantités toujours croissantes d'engrais chimiques dans ces pays a assuré une forte augmentation du rendement de toutes les cultures. D'après l'appréciation des chercheurs ouest-européens, 50 % au moins de tout l'accroissement des récoltes de plantes cultivées s'expliquent par l'emploi de ces engrais. Les savants américains estiment que chaque facteur déterminant l'augmentation du rendement s'exprime comme suit (en %): engrais — 41, désherbants — 13-20, beau temps — 15, semences hybrides — 8, irrigation — 5, autres facteurs — 11-18.

En Union Soviétique, la production et l'utilisation des engrais minéraux croissent à des cadences excessivement rapides, exerçant une grande influence sur le rendement des cultures.

Avant la Révolution, lorsque la Russie ne possédait pas une industrie chimique développée, les engrais minéraux ne se produisaient

qu'en faible quantité* (89 000 tonnes en 1913). Après la Révolution d'Octobre ont été découverts d'immenses gisements de matières premières pour la production d'engrais (apatites, phosphorites, sels de potassium), une puissante industrie chimique a été créée et la production d'engrais azotés, phosphatés et potassiques a vu un essor rapide.

En 1940 la production d'engrais minéraux était de 3,2 millions de tonnes; en 1955, la production d'engrais avait triplé et elle continuait à tripler à chaque décennie suivante (1955-1965 et 1965-1975). En 1975, on produisait 90 millions de tonnes, 72 millions étaient utilisés en agriculture. Par ses rythmes de croissance, ainsi que par le volume global de la production et de l'emploi des engrais minéraux, l'U.R.S.S. tient la première place au monde.

Une importance exceptionnelle est accordée, en U.R.S.S., à l'emploi généralisé des procédés chimiques dans l'agriculture, à l'élargissement de la production et à l'utilisation des engrais. On prévoit pour 1985 une production d'engrais minéraux de 150 à 155 millions de tonnes en unités conventionnelles (35 à 37 millions de tonnes calculées en 100 p. cent de teneur d'éléments fertilisants). La tâche est actuellement d'augmenter la production d'engrais concentrés et d'engrais complexes.

On perfectionne parallèlement le système des services agrotechniques desservant les kolkhozes et les sovkhozes, dans le but d'augmenter l'efficacité de l'utilisation des engrais minéraux et des moyens chimiques de protection des plantes. On prévoit une amélioration ultérieure de la qualité des engrais minéraux; le développement de la base matérielle de l'emploi généralisé des procédés chimiques (construction de grands dépôts mécanisés pour le stockage des engrais et des pesticides; leur équipement en mécanismes de chargement et de déchargement, ainsi qu'en mélangeurs); la fondation de stations de chimie agricole dans les kolkhozes et les sovkhozes et sur la base de la coopération entre exploitations pour l'accomplissement de tous les travaux de chimie agricole, et en conformité avec les recommandations des laboratoires d'agrochimie.

La production accrue d'engrais minéraux permet d'utiliser ceux-ci non seulement pour les cultures industrielles, mais aussi pour les cultures céréalières et fourragères et d'augmenter considérablement leur rendement (tableau 2).

Un grand nombre d'expériences ont permis de conclure que l'accroissement moyen de rendement pour 1 q de nitrate d'ammoniaque est de 4 à 5 q pour les céréales, de 20 à 30 q pour la pomme de terre et de 40 à 50 q par hectare pour la betterave sucrière. Un quintal de superphosphate épandu en couverture augmente le rendement en grain de 1,5 à 2 q/ha et de 5 à 6 q/ha quand il est enfoui au moment

---

* On appelle unités conventionnelles d'engrais standard des engrais renfermant les quantités suivantes de substances nutritives : 20,5% de N pour les engrais azotés ; 18,7% de P_2O_5 pour les engrais phosphatés et 41,6% de K_2O pour les engrais potassiques.

des semis. Le tableau 3 montre les accroissements moyens de rendement par tonne d'élément fertilisant. L'efficacité des engrais minéraux dépend du degré d'approvisionnement des sols en formes mobiles d'éléments fertilisants, de la quantité de précipitations, du niveau de l'agrotechnique et d'autres conditions. Elle n'est pas la même dans des zones pédoclimatiques différentes.

Les engrais sont particulièrement efficaces en agriculture irriguée et dans les régions suffisamment humides.

Correctement employés, les engrais chimiques procurent un effet

Tableau 2

Utilisation des engrais minéraux (en q d'engrais standard par hectare) et rendement du cotonnier et de la betterave sucrière (en q/ha)

Années	Coton brut		Betterave sucrière	
	Engrais	Rendement	Engrais	Rendement
1933	0,75	7,4	1,52	74
1940	4,9	13,8	6,25	129
1956-1960	9,3	20,5	8,1	184
1961-1965	9,7	20,6	8,9	165
1966-1970	13,7	24,1	9,5	228
1971-1975	15,7	27,3	13,1	220
1977	17,0	29,3	20,2	248

Tableau 3

Accroissement du rendement des cultures suivant les engrais minéraux employés

Culture	Accroissement du rendement (en tonnes) par tonne d'élément fertilisant		
	Azote (N)	Phosphore (P_2O_5)	Potassium (K_2O)
Blé d'hiver et seigle	12-15	7-8	3-4
Pomme de terre	100-120	50-60	40-50
Lin	1,5-2,5	1,2-2,0	0,9-1,5
Betterave sucrière	120-140	55-60	40-50
Cotonnier	10-12	5-6	2

économique élevé. La première année, ils sont remboursés de 3 à 5 fois.

Le chaulage des sols humides et l'utilisation d'engrais organiques permettent d'obtenir de bonnes récoltes stables.

D'après certains établissements de recherche, le fumier épandu à raison de 20 à 30 tonnes à l'hectare donne les accroissements moyens suivants de rendement (en q/ha): céréales 6 à 7; pomme de terre 60 à 70; chou 70 à 80 et herbes fourragères 150 à 200.

L'augmentation du rendement des céréales et d'autres cultures au cours des dernières années est surtout déterminée par une plus grande utilisation des engrais minéraux et organiques, par un usage plus large du chaulage des sols acides.

Pour que la fumure soit plus efficace, il faut bien connaître les propriétés des engrais et les moyens de les utiliser, compte tenu des conditions pédoclimatiques concrètes, des particularités biologiques et de l'agrotechnique. Il est impossible d'utiliser efficacement les engrais si l'on ne tient pas compte des acquis de la science et de l'expérience des économies de pointe, si les spécialistes et autres travailleurs de l'agriculture n'ont pas reçu une bonne formation agrochimique.

L'application de la chimie à l'agriculture, l'emploi rationnel des engrais associés à d'autres procédés d'intensification et à une plus grande culture de la production agricole assureront la croissance ultérieure de la productivité de l'agriculture et de l'élevage.

CHAPITRE PREMIER

LES PRINCIPES DE LA NUTRITION (ALIMENTATION) DES PLANTES

LA COMPOSITION CHIMIQUE DES PLANTES ET LA QUALITÉ DE LA RÉCOLTE

Les organismes végétaux se composent d'eau et de matière sèche, représentée par des composés organiques et minéraux.

La **teneur en eau** et en matière sèche des plantes, de leurs organes et tissus peut fortement varier. L'eau constitue de 5 à 10 % de la masse des graines des plantes oléagineuses, 10 à 15 % du grain des céréales et des légumineuses, 75 à 80 % des tubercules de pommes de terre, des racines de betteraves sucrières, de 85 à 90 % des racines de carottes, de betterave rouge ou fourragère, de 90 à 93 % des racines de radis et de choux-raves, des têtes de choux, de 95 % dans les légumes-fruits et les légumes-feuilles.

La teneur en eau des tissus des organes végétatifs des plantes en pleine croissance varie entre 70 et 95 % ; dans les tissus de réserve des graines et dans les cellules des tissus de soutien, elle est de 5 à 15 %. A mesure que les plantes vieillissent, la réserve générale d'eau et la teneur relative des tissus en eau, surtout de ceux des organes de reproduction, diminuent.

Pour que le métabolisme des plantes soit normal, leurs cellules et leurs tissus doivent être saturés d'eau. Dans les cellules des plantes, l'eau se trouve à l'état liquide (dans les membranes, le cytoplasme et le suc cellulaire) et à l'état gazeux (dans les espaces intercellulaires).

Un tiers environ de l'eau dans les cellules végétales se trouve dans le suc vacuolaire ; le reste, dans le cytoplasme et la membrane cellulaire.

Les fonctions de l'eau dans les plantes sont déterminées par ses propriétés physiques et chimiques. Elle possède une capacité calorifique élevée et grâce à sa faculté de se vaporiser à n'importe quelle température, elle stabilise la température des plantes, les protège contre le surchauffement. L'eau est le solvant idéal de beaucoup de composés, c'est en milieu aqueux que se produit leur dissociation électrolytique en ions et l'assimilation, par les plantes, des ions renfermant les éléments nécessaires à leur nutrition minérale.

La tension superficielle élevée de l'eau détermine son rôle dans différents processus d'adsorption et de circulation des composés minéraux et organiques. Les propriétés polaires et la belle ordonnance structurale des molécules d'eau provoque l'hydratation des

ions et molécules de composés à haute et basse masse moléculaire dans les cellules végétales.

L'eau joue un rôle important dans les transformations énergétiques des plantes et, avant tout, dans l'accumulation de l'énergie solaire sous forme de composés chimiques par photosynthèse. L'eau possède en plus la faculté de laisser passer les rayons de lumière visible et la partie ultraviolette rapprochée d'elle, nécessaire à la photosynthèse, mais elle retient une certaine partie de la radiation infrarouge thermique.

La présence d'eau dans les cellules des tissus végétaux détermine leur turgescence, c'est un important facteur d'intensité et d'orientation des différents processus physiologiques et biochimiques. Avec la participation directe de l'eau, il se produit une immense quantité de réactions biochimiques de synthèse et de décomposition des composés organiques dans les organismes végétaux.

L'eau n'est pas seulement le solvant des sels minéraux provenant du sol et le milieu de transfert et d'échange des substances dans les plantes, c'est une partie inséparable de leurs cellules.

La teneur des plantes en eau dépend de l'espèce et de l'âge des plantes, des conditions de ravitaillement en eau, de la transpiration et, à un certain point, des conditions de la nutrition minérale. A côté d'autres facteurs du milieu extérieur, l'alimentation en eau exerce beaucoup d'influence sur la récolte des plantes cultivées et sa qualité et sur l'efficacité des engrais.

A 90-95 % la matière sèche des plantes est représentée par des composés organiques, protéines et autres substances azotées, des glucides (sucres, amidon, cellulose, pectines), des lipides dont la teneur détermine la richesse de la récolte. La teneur moyenne en eau, en groupes majeurs de composés organiques et en cendre dans la partie marchande de la récolte des principales cultures agricoles est représentée au tableau 4.

La récolte de matière sèche extraite de la partie marchande de la récolte des principales cultures agricoles peut varier dans de très grandes limites, de 15 à 100 et plus q/ha.

La valeur de certains composés organiques dépend de l'espèce et du caractère de l'utilisation des plantes. Les principales substances qui déterminent la qualité de la récolte en grain des céréales sont les protéines et l'amidon. C'est le blé qui, parmi les céréales, est le plus riche en protéine ; le riz et l'orge de brasserie, en amidon. Quand on utilise l'orge pour la brasserie, une teneur en protéines trop élevée dans le grain nuit à la qualité de la matière première. Il n'est pas non plus désirable que la teneur en protéine et, particulièrement, en composés azotés non protéiques, augmente dans les racines de betteraves sucrières et dans les tiges de canne à sucre cultivées en vue de la fabrication du sucre. Les légumineuses à grains et herbacées se distinguent par une teneur accrue en protéines et moins élevée en glucides, la richesse de leur récolte est déterminée avant tout, par la quantité de protéine emmagasinée. La qualité de la récolte de pom-

mes de terre est estimée d'après leur teneur en amidon, celle de betterave sucrière par la teneur en saccharose, un glucide. Les plantes oléagineuses sont cultivées pour obtenir des lipides, huiles végétales utilisées comme graisse alimentaire ou industrielle. La culture des plantes textiles, lin, chanvre, cotonnier, a pour but d'obtenir une

Tableau 4

Composition chimique moyenne d'une récolte de plantes cultivées (en %)

Culture et partie récoltée	Eau	Protéines	Protéine brute *	Lipides	Amidon, sucre et autres glucides **	Cellulose	Cendre
Blé (grain)	12	14	16	2,0	65	2,5	1,8
Seigle (grain)	14	12	13	2,0	68	2,3	1,6
Avoine (grain)	13	11	12	4,2	55	10,0	3,5
Orge (grain)	13	9	10	2,2	65	5,5	3,0
Riz (grain poli)	11	7	8	0,8	78	0,6	0,5
Maïs (grain)	15	9	10	4,7	66	2,0	1,5
Sarrazin (grain)	13	9	11	2,8	62	8,8	2,0
Pois (grain)	13	20	23	1,5	53	5,4	2,5
Haricots (grain)	13	18	20	1,2	58	4,0	3,0
Soja (grain)	11	29	34	16,0	27	7,0	3,5
Tournesol (graines)	8	22	25	50	7	5,0	3,5
Lin (graines)	8	23	26	35	16	8,0	4,0
Pommes de terre (tubercules)	78	1,3	2,0	0,1	17	0,8	1,0
Betteraves sucrières (racines)	75	1,0	1,6	0,2	19	1,4	0,8
Betteraves fourragères (racines)	87	0,8	1,5	0,1	9	0,9	0,9
Carottes (racines)	86	0,7	1,3	0,2	9	1,1	0,9
Oignons (bulbes)	85	2,5	3,0	0,1	8	0,8	0,7
Trèfle (masse verte)	75	3,0	3,6	0,8	10	6,0	3,0

* La protéine brute comprend les protéines et les composés azotés non protéiques.
** Excepté la cellulose.

bonne récolte de fil textile formé par la cellulose. L'accumulation d'une quantité excessive de cellulose dans la masse verte et dans le foin d'herbes annuelles et vivaces porte préjudice à leurs qualités nutritives.

Différents groupes de composés organiques contenus dans la récolte de diverses cultures agricoles ne sont pas d'une qualité égale.

La richesse de la récolte de plantes cultivées peut dépendre aussi de la présence de composés organiques, dont la quantité est assez réduite: vitamines, alcaloïdes, glucosides, acides organiques, huiles essentielles et huile de moutarde.

Protéines et autres composés azotés. Les protéines sont des composés organiques à masse moléculaire élevée, constitués de centaines

et de milliers de radicaux d'un nombre assez limité d'acides aminés. Les protéines sont la base même de la vie des organismes et elles jouent un rôle décisif dans tous les métabolismes. Les protéines remplissent des fonctions structurales et catalytiques, elles constituent une des principales réserves de matière des plantes.

La teneur en protéines des organes végétatifs des plantes est environ de 5 à 20 % de leur masse, dans les graines de céréales: de 6 à 20 %, dans les grains des légumineuses et des plantes oléagineuses de 20 à 35 %.

Les protéines ont une composition élémentaire assez stable (en %): carbone 51-55, oxygène 21-24, azote 15-18, hydrogène 6,5-7, soufre 0,3-1,5.

Par leur structure, les protéines se divisent en deux groupes: les protéines ou protides simples, constitués de radicaux d'acides aminés et les protéines complexes ou protéides renfermant une protéine simple ayant solidement fixé un composé non protéique.

D'après leur solubilité, les protéines se subdivisent en fractions: albumines, solubles dans l'eau; globulines, solubles dans de faibles (4-10 %) solutions de sels neutres; prolamines, solubles dans l'alcool (alcool éthylique à 70 %); glutélines, solubles en solutions alcalines.

Les différentes fractions des protéines se distinguent les unes des autres par la composition et le nombre des radicaux d'acides aminés qu'elles renferment, ainsi que par leurs fonctions. Les albumines et les globulines, par exemple, sont des protéines à masse moléculaire relativement basse, de nombreuses protéines s'y rattachent, les enzymes, qui catalysent toutes les réactions biochimiques dans les organismes végétaux.

Les protéines complexes renfermant des lipides sont appelées lipoprotéides. Elles entrent dans la composition des membranes cellulaires et déterminent leur perméabilité sélective, constituent la base des structures intracellulaires. Les nucléoprotéides renferment une protéine liée à des acides nucléiques et remplissent d'importantes fonctions dans la biosynthèse des protéines et le transfert de l'information génétique. Des glucides et leurs dérivés, des métaux, des radicaux d'acide phosphorique, des composés pigmentés non protéiques peuvent être aussi partie constituante des protéides. Des protéines complexes de ce genre sont respectivement appelées métallo, phospho ou chromoprotéides. Elles participent aux processus les plus divers du métabolisme des organismes et le chromoprotéide, attaché à la chlorophylle prend part à la photosynthèse.

L'unité de structure fondamentale de toutes les protéines est constituée par les acides aminés, acides organiques gras ou aromatiques renfermant, en plus du groupe carboxyle—COOH, un ou deux groupes amines—NH_2.

Les protéines des plantes cultivées se distinguent par la composition de leurs fractions et de leurs acides aminés. Ainsi, la masse essentielle des protéines des grains de légumineuses et des plantes oléagineuses est constituée par les globulines, tandis que les prolamines

se rencontrant seulement dans les graines des graminées Les prolamines et les glutélines entrent dans la composition du gluten du blé qui détermine les propriétés technologiques et les qualités boulangères du grain.

Une importance particulière dans les protéines végétales revient aux acides aminés dits essentiels (valine, leucine, isoleucine, thréonine, méthionine, histidine, lysine, tryptophane, phénylalanine) qui ne peuvent être synthétisés dans les organismes de l'homme et des animaux. Hommes et animaux ne reçoivent ces acides aminés qu'avec les denrées d'origine végétale et les fourrages.

C'est pourquoi la qualité de la production végétale est appréciée non seulement par sa composition, mais aussi par sa digestibilité, la valeur de ses protéines estimée d'après leur composition en fractions et en acides aminés.

La majeure partie de l'azote des graines (non moins de 90 % de la quantité totale d'azote) et des organes végétatifs de la plupart des plantes (75-90 %) entre dans la composition des protéines. Les tubercules de pommes de terre, les raves, les légumes-feuilles renferment une beaucoup plus grande quantité de composés azotés non protéiques (jusqu'à la moitié de la quantité totale d'azote). Etant représentés dans les plantes par des composés minéraux (nitrates, ammoniac) et organiques (parmi lesquels prédominent les acides aminés libres et les amides), ils sont bien assimilés par les animaux et par l'homme, ont une valeur biologique assez élevée.

Une petite partie de composés organiques non protéiques des végétaux est représentée par des peptides (construits à partir d'un nombre limité de radicaux d'acides aminés et ayant, par conséquent, en comparaison des protéines, une masse moléculaire assez basse, ainsi que par des bases puriques et pyrimidiques (entrant dans la composition des acides nucléiques).

Pour apprécier la qualité de la production végétale, on se sert souvent de l'indice « protéine brute » par lequel on exprime la somme de tous les composés azotés (protéine et composés non protéiques). On calcule la protéine brute en mutipliant la teneur des plantes (en %) en azote total par le coefficient 6,25 (obtenu à partir de la teneur moyenne en azote, 16 %, de la protéine et des composés non protéiques).

Les glucides. Dans les plantes, les glucides sont représentés par des mono et oligosaccharides (sucres) et des polysaccharides (amidon, cellulose, pectines).

Les *sucres* se trouvent en petites quantités dans toutes les plantes cultivées et ils peuvent s'accumuler comme réserve dans les racines et certains organes de légumes, le raisin, les baies et les fruits. Les monosaccharides prédominants dans la plupart des plantes sont le glucose et le fructose et, parmi les oligosaccharides, un disaccharide, le saccharose.

Dans les plantes, le glucose et le fructose se trouvent à l'état libre sous la forme d'esters de l'acide phosphorique, ils entrent aussi

dans la composition de beaucoup d'oligo et polysaccharides, de glucosides. Les monosaccharides et, avant tout, le glucose, sont les principaux matériaux énergétiques au cours de la respiration des plantes, leurs esters phosphoriques participent, à côté d'autres sucres phosphatés, à la photosynthèse, à la synthèse des glucides complexes et à d'autres processus métaboliques. Le goût sucré de bien des fruits et baies est dû à la présence de glucose et de fructose à l'état libre. En quantités importantes (8 à 15 %), le glucose est contenu dans le raisin et il constitue près de la moitié de tous les sucres des fruits et des baies. Le fructose s'accumule en abondance dans les fruits à noyaux (6-10 %), on le trouve aussi dans le miel. Il est plus sucré que le glucose et que le saccharose. Dans les plantes-racines, la proportion de monosaccharides parmi les sucres n'est pas élevée (jusqu'à 1 % de leur teneur totale).

Le saccharose est construit de radicaux de molécules de glucose et de fructose. Il se trouve en petites quantités dans toutes les plantes; les fruits et les baies, certains légumes comme la carotte et la betterave rouge, l'oignon en renferment davantage (4 à 8 %).

Le saccharose est le principal glucide de réserve dans les racines de la betterave sucrière (14-22 %) et dans le suc des tiges de canne à sucre (11 à 25 %). On cultive ces plantes pour la fabrication du sucre servant à l'alimentation.

En petites quantités, l'*amidon* est contenu dans tous les organes verts des plantes, mais en qualité de principal glucide de réserve il s'accumule dans des organes tels que les tubercules, les bulbes, les graines. La teneur en amidon des tubercules de pommes de terre est de 10 à 14 % pour les variétés hâtives, de 16 à 22 % pour les variétés demi-tardives ou tardives, soit 70 à 80 % de leur matière sèche. La proportion d'amidon dans les graines de riz et d'orge de brasserie est à peu près la même. Dans le grain d'autres céréales, il y a usuellement de 55 à 70 % d'amidon. On constate une proportionnalité inverse entre la teneur des plantes en protéines et en amidon. Il y a moins d'amidon dans les grains des légumineuses que dans les graines des graminées et encore moins dans les graines des plantes oléagineuses.

L'amidon se compose d'amylase et d'amylopectines (respectivement 15 à 25 et 75 à 85 %), de polysaccharides composés d'une énorme quantité de radicaux de glucose. L'amylase a une moindre masse moléculaire (100 000-600 000) que l'amylopectine (1 000 000). A la différence de l'amylase, l'amylopectine n'a pas de chaînes linéaires de radicaux de glucose, mais des ramifications difficilement hydrolysables. L'amylase se dissout dans l'eau sans former de colle et produit, avec l'iode, une coloration bleue. En eau chaude, l'amylopectine forme une colle et donne, avec l'iode, une coloration violette.

L'amidon est un glucide aisément assimilé par l'organisme des hommes et des animaux. Par hydrolyse fermentative (sous l'action des enzymes amylases) ou acide il se décompose jusqu'au glucose.

La *cellulose* est la composante essentielle des membranes cellu-

laires (dans les plantes, elle est liée à la lignine, aux pectines, aux micas et autres composés). La fibre du cotonnier est composée à 95-98 % de cellulose, celles du lin, du chanvre, du jute à 80-90 %. Les graines de céréales à balles (avoine, riz, mil) en contiennent 10 à 15 % ; les grains non vêtus des céréales, de 2 à 3 % ; les grains des légumineuses, de 3 à 5 % ; les plantes-racines et les tubercules de la pomme de terre, environ 1 %. La matière sèche des organes végétatifs des plantes renferme de 25 à 40 % de cellulose.

La cellulose est un polysaccharide à chaîne non ramifiée de radicaux de glucose ; sa masse moléculaire varie de quelques centaines de milliers à plusieurs millions. Son hydrolyse totale a pour résultat le glucose.

Les *pectines* sont des polysaccharides à haute masse moléculaire contenues dans les fruits, les plantes-racines, les fibres végétales. Dans les plantes textiles, elles réunissent entre eux les faisceaux de fibres. Les pectines ont la propriété de former une gelée en présence d'acides ou de bases, ce qui est utilisé en confiserie.

Ces polysaccharides sont construits de chaînes de radicaux d'acide polygalactonurique, formés par oxydation du monosaccharide galactose avec des groupes méthyles.

Les **lipides** sont les constituants de la structure du cytoplasme des cellules végétales et dans les plantes oléagineuses, ils jouent le rôle de réserves. Les lipides de structure sont ordinairement en petites quantités, de 0,5 à 1 % de la masse brute des plantes, mais les fonctions qu'ils remplissent dans les cellules végétales sont importantes. Ils règlent, par exemple, la perméabilité des membranes. Les graines des plantes oléagineuses et du soja servent à obtenir des graisses végétales appelées huiles.

La teneur moyenne en lipides des graines de certaines plantes oléagineuses et du soja sont (en %):

ricin	-60	lin, chanvre	30
sésame, pavot, olive	45-50	moutarde	30-35
tournesol	24-50	cotonnier	25
		soja	20

Les graines des céréales, les grains des légumineuses (excepté le soja) renferment de 2 à 5 % de lipides.

Par leur structure chimique, les huiles végétales sont un mélange d'esters de glycérol, alcool triatomique, et d'acides gras à haute masse moléculaire. Les acides non saturés des huiles végétales sont les acides oléique, linoléique et linolénique ; les acides saturés, les acides palmitique et stéarique. La composition des acides gras des huiles végétales détermine leurs propriétés : consistance, température de fusion, aptitude à la dessication, à rancir, à se saponifier, ainsi que leur qualité alimentaire. Les acides gras linoléique et linolénique ne sont contenus que dans les huiles végétales. L'homme ne peut pas

se passer de ces substances car son organisme n'est pas capable de les synthétiser. Les lipides sont les réserves les plus avantageuses du point de vue énergétique, leur oxydation libère deux fois plus d'énergie que celle des glucides et des protéides.

Parmi les lipides on range également les phosphatides, les cires, des caroténoïdes, des stéarines et les vitamines liposolubles A, D, E et K.

La teneur des produits agricoles en différents composés organiques et, par conséquent, leur qualité peut varier considérablement suivant les espèces et les variétés des plantes, les conditions et les procédés de culture.

Les conditions d'alimentation des plantes sont d'une grande importance pour l'accroissement de la récolte globale de la partie la plus précieuse de la moisson et pour l'amélioration de sa qualité. Par exemple, une amélioration de la nutrition azotée augmente la teneur relative des plantes en protéine et le gain de celle-ci dans la récolte de production marchande, une meilleure alimentation en phosphore et en potassium favorise une plus grande accumulation des glucides, saccharose, dans les racines de la betterave sucrière et amidon dans les tubercules de la pomme de terre. Les engrais phosphatés et potassiques font augmenter dans les plantes oléagineuses leur teneur en lipides dont ils améliorent la qualité. En assurant des conditions d'alimentation convenables on peut, au moyen d'engrais, augmenter l'accumulation des composés organiques les plus précieux du point de vue économique dans la matière sèche de la moisson.

La composition élémentaire moyenne de la *matière sèche* des plantes (en %) est la suivante: carbone-45; oxygène-42; hydrogène-6,5; azote et autres éléments multiples-6,5. On a découvert en tout, dans les plantes, plus de 70 éléments chimiques (il est probable que ce nombre augmentera encore à mesure que les méthodes d'analyses se perfectionneront).

Les glucides, les lipides et autres composés organiques non azotés sont constitués de trois éléments: carbone, oxygène et hydrogène; dans la composition des protéines et autres composés organiques azotés entre encore l'azote. Ces quatre éléments, C, O, H et N ont reçu le nom d'éléments *organogènes*, ils constituent ensemble en moyenne environ 95 % de la matière sèche des plantes.

Quand on fait brûler des végétaux, les éléments organogènes se vaporisent sous forme de composés gazeux et de vapeurs d'eau, il reste dans la cendre, principalement sous forme d'oxydes, de nombreux éléments minéraux représentant en moyenne 5 % en tout de la matière sèche.

L'azote et les éléments minéraux tels que le phosphore, le potassium, le calcium, le magnésium, le soufre et le fer sont assez abondants dans les plantes (de quelques p.c. à des centièmes de p.c. de la matière sèche); ce sont des *macroéléments* (éléments majeurs et secondaires).

Pour un développement normal, les plantes ont encore besoin, en plus des éléments majeurs, de petites quantités de bore, de manganèse, de cuivre, de zinc, de molybdène, de cobalt et de vanadium. Le taux de chacun de ces éléments, qui ont reçu le nom d'*oligo-éléments*, dans les plantes varie entre quelques millièmes et quelques cent-millièmes de p.c.

Les différences quantitatives de teneur en macro et oligo-éléments dans la composition de la matière sèche des plantes sont illustrées par les données du tableau 5.

Tableau 5

Teneur en atomes d'éléments principaux de l'alimentation minérale (en milliers pour 1 milliard d'atomes) dans la matière sèche d'une plante type

Macroéléments		Oligo-éléments	
N	10 000	B	3
P	1 060	Mn	1
K	3 760	Zn	0,3
Ca	1 840	Cu	0,1
Mg	1 740	Mo	0,005
S	580	Co	0,001
		Fe	130

Les teneurs relatives des plantes et de leurs organes en azote et en éléments minéraux varient assez largement ; elles sont déterminées par les particularités biologiques de la culture, son âge, ses conditions d'alimentation.

La quantité d'azote dans les plantes est en étroite corrélation avec la teneur en protéines ; or, celles-ci sont toujours plus abondantes dans les graines et les jeunes feuilles que dans la paille des cultures à maturité. Les fanes renferment plus d'azote que les tubercules et les plantes-racines. Dans la partie marchande de la récolte des principales cultures agricoles, les minéraux constituent de 2 à 5 % de la matière sèche et de 6 à 14 % dans les jeunes feuilles et la paille des céréales, dans les fanes des plantes-racines et des plantes à tubercules. Les légumes-feuilles (salade, épinards) ont la plus grande teneur en minéraux (jusqu'à 20 % et plus).

La teneur des plantes en éléments minéraux présente aussi d'importantes différences (tableau 6). Dans la cendre des graines de céréales et de légumineuses, la somme des oxydes de phosphore, de potassium, de magnésium atteint 90 % avec prédominance du phosphore (40 à 50 % de la masse de la cendre). La proportion du phosphore dans la cendre des feuilles et de la paille est beaucoup moindre et c'est le potassium et le calcium qui y prédominent. La cendre des tubercules de pommes de terre, de racines de betterave sucrière et

d'autres plantes-racines est surtout composée d'oxyde de potassium (40 à 60 % de la masse de la cendre). La cendre des plantes-racines renferme une grande quantité d'oxyde de sodium ; la paille des céréa-

Tableau 6

Teneur approximative de la cendre des plantes en éléments divers (en % de sa masse)

Culture et partie récoltée	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	SiO_2
Blé							
grain	48	30	3	12	5	2	2
paille	10	30	20	6	3	3	20
Pois							
grain	30	40	5	6	10	1	1
paille	8	25	35	8	6	2	10
Pomme de terre							
tubercules	16	60	3	5	6	2	2
fanes	8	30	30	12	8	3	2
Betterave sucrière							
racines	15	40	10	10	6	10	2
fanes	8	30	15	12	5	25	2
Tournesol							
graines	40	25	7	12	3	3	3
tiges	3	50	15	7	3	2	6

les, d'oxyde de silicium. Les légumineuses et les crucifères se distinguent par une plus grande teneur en soufre.

Le silicium, le sodium, le chlore entrent en assez grande quantité dans la composition des plantes, ainsi qu'un grand nombre d'éléments dits *ultra-oligo-éléments*, dont la part est extrêmement réduite, de 10^{-6} à 10^{-8} %. Les fonctions physiologiques n'en sont pas encore définitivement élucidées, non plus que la nécessité absolue de ces éléments pour les plantes.

LE RÔLE DE CERTAINS ÉLÉMENTS DANS LA VIE DES PLANTES ET L'EXPORTATION DES SUBSTANCES NUTRITIVES AVEC LA RÉCOLTE

Bien que les plantes exigent des quantités fort différentes de tel ou tel élément, chaque macro et oligo-élément dans les plantes joue un rôle strictement déterminé, aucun élément ne peut donc être remplacé par un autre, c'est-à-dire que du point de vue physiologique ils ont tous la même valeur. La déficience de l'un ou l'autre élément, majeur ou oligo-élément, entraîne une perturbation du métabolisme et des processus physiologiques dans les plantes, freine leur croissance et leur développement, la récolte décroît, sa qualité baisse. Une carence en éléments nutritifs s'accompagne, chez les plantes, de signes caractéristiques.

L'*azote* entre dans la composition des protéines, des enzymes, des acides nucléiques, de la chlorophylle, des vitamines, des alcaloïdes. Un signe typique de la carence en azote est un retard de croissance des organes végétatifs des plantes et l'apparition d'une coloration vert pâle ou même jaune vert des feuilles, dus à la mauvaise formation de la chlorophylle. L'azote est réutilisé dans les plantes et les signes de son insuffisance se manifestent d'abord sur les feuilles inférieures. Ce sont d'abord les nervures de la feuille qui jaunissent, puis les bords du limbe. En cas d'insuffisance d'azote aiguë ou prolongée, la couleur vert pâle des feuilles passe à divers tons de jaune, d'orangé, de rouge (suivant la plante), puis les feuilles atteintes se dessèchent et meurent prématurément. Quand la quantité d'azote est suffisante, les feuilles sont vert foncé, le tallage se fait bien, les plantes forment un puissant appareil de tiges et de feuilles pour l'assimilation, et, ensuite, des organes reproducteurs sains.

Le niveau de l'alimentation azotée détermine le volume et l'intensité de la synthèse des protéines et des autres composés organiques azotés des plantes, ainsi que les processus de croissance. La pénurie d'azote se manifeste surtout à la période initiale de la croissance des organes végétatifs. Une faible formation des tiges et des feuilles, c'est-à-dire de l'appareil de photosynthèse, freine à son tour, la formation des organes de la fructification et entraîne une baisse de la récolte et une diminution des protéines dans les produits agricoles.

L'azote joue un rôle primordial dans la vie des plantes et en agriculture. En même temps, la déficience d'azote est le plus souvent le principal facteur limitant l'augmentation des récoltes sur des sols divers. La pénurie d'azote est particulièrement sensible sur les sols pauvres en matière organique, surtout d'une composition mécanique légère. L'emploi d'engrais azotés est d'une importance majeure si l'on veut obtenir des récoltes plus abondantes et d'une meilleure qualité, créer une base fourragère assurée pour l'élevage. Cependant, une consommation excessive d'azote, les autres éléments étant en quantité insuffisante, retarde le développement et la maturation des plantes, stimule la croissance des organes végétatifs aux dépens de la formation de la partie marchande de la récolte et de sa qualité (surtout pour les tubercules et les plantes-racines). Chez certaines céréales et plantes textiles une alimentation excessive en azote seul peut provoquer la verse.

Le *phosphore* entre dans la composition des protéines complexes et joue un rôle important dans les échanges d'énergie au sein des organismes végétaux. L'énergie de la lumière solaire au cours de la photosynthèse et l'énergie libérée pendant la respiration par oxydation de composés organiques précédemment synthétisés s'accumulent dans les plantes sous la forme d'énergie des liaisons phosphates dans les composés dits riches en énergie dont le principal est le triphosphate d'adénosine (ATP). L'énergie accumulée dans l'ATP au cours de la phosphorylation photosynthétique et par oxydation est utilisée pour assurer tous les processus de la croissance et du déve-

loppement de la plante, de synthèse des composés organiques et de leur transport. Si le phosphore vient à manquer, les échanges d'énergie et de matières dans les plantes sont dérangés. Les signes de carence phosphorique sont d'ordinaire déjà visibles au début du développement des plantes, lorsque leur système radiculaire est encore faible et qu'elles ne sont pas capables d'assimiler les phosphates peu solubles du sol. En cas de déficience de phosphore, la croissance des graminées se ralentit fortement, leurs feuilles prennent (sur les bords d'abord et sur toute la surface ensuite) une couleur gris vert, rouge vif ou violacée. Pour le maïs, ces signes peuvent apparaître aussitôt après la formation des jeunes pousses, surtout par temps froid. Chez les céréales, la pénurie de phosphore affaiblit le tallage et la formation de tiges donnant des épis.

En cas de carence en phosphore, les feuilles de la betterave sucrière sont petites, bleuâtres. Leurs bords, surtout ceux des feuilles inférieures, meurent et noircissent, la noirceur embrassant même les nervures. Pour la pomme de terre, l'insuffisance de phosphore se traduit par la formation de petites feuilles vert foncé aux limbes enroulés en l'air en tuyau. Chez les tomates, la face inférieure des feuilles, puis leurs pédoncules et leurs tiges prennent une coloration violacée propre à l'insuffisance de phosphore. Le cotonnier et le tournesol retardent leur croissance, forment de petites feuilles qui meurent vite.

Dans toutes les plantes, le manque de phosphore retentit fortement sur la formation des organes reproducteurs. Il freine la maturation, provoque une baisse de la récolte et la détérioration de sa qualité.

Le *potassium* participe à la synthèse et au transport des glucides dans les plantes, il est à l'origine de la capacité qu'ont les cellules et les tissus de retenir l'eau, influe sur la résistance des plantes aux intempéries, aux facteurs physiques et aux maladies.

Le signe extérieur de la carence en potassium est un brunissement marginal des feuilles. La pointe et les bords des feuilles ont l'air brûlé, de petites taches de rouille apparaissent sur les limbes. Les cellules se développent irrégulièrement, si bien que les feuilles se gaufrent, s'enroulent en forme de coupole. On voit aussi sur certaines feuilles un enduit bronzé typique. C'est surtout dans la culture des tubercules, des plantes-racines, du chou, des plantes à ensiler et des herbes vivaces que l'insuffisance de potassium se constate. Les céréales sont moins sensibles à cette pénurie. Mais en cas de déficience prononcée, elles aussi tallent mal, les entre-nœuds des tiges se raccourcissent, les feuilles, surtout celles du bas, se fanent, même si le sol est assez humide. Ce sont le plus souvent les sols légers ou tourbeux, les terres inondées qui sont pauvres en potassium.

Le *calcium* joue un rôle important dans la photosynthèse et la circulation des glucides, dans l'assimilation de l'azote par les plantes. Il participe à la formation des membranes cellulaires, détermine l'hydratation et le maintien de la structure des organites cellulaires.

La pénurie de calcium retentit avant tout sur l'état du système radiculaire des plantes : la croissance des racines est ralentie, il ne se forme pas de poils absorbants, les racines deviennent gluantes et pourrissent. Quand le taux de calcium est bas, la croissance des feuilles est aussi retardée, elles se couvrent de taches chlorotiques, puis jaunissent et meurent prématurément. A la différence de l'azote, du phosphore et du potassium, le calcium n'est pas réutilisé, c'est pourquoi les signes de carence calcique se manifestent avant tout sur les jeunes feuilles. L'insuffisance de calcium s'observe aussi quand on cultive sur sols acides, surtout légers.

Le *magnésium* entre dans la composition de la chlorophylle, il participe à la circulation du phosphore dans les plantes et au métabolisme des glucides, influe sur l'activité des oxydo-réductions. Le magnésium entre également dans la composition de la phytine, principal composé organique phosphoré de réserve. Quand le taux de magnésium est insuffisant, la teneur en chlorophylle des parties vertes des plantes diminue et la chlorose apparaît entre les nervures de la feuille (les nervures mêmes restant vertes). Une forte insuffisance de magnésium donne aux feuilles un aspect marbré, elles s'enroulent et jaunissent. En agriculture, la pénurie de magnésium se manifeste le plus souvent sur les sols et les limons sableux à réaction acide.

Le *soufre* est d'une grande importance pour la vie des plantes dans lesquelles il entre surtout dans la composition des protéines (les acides aminés cystéine, cystine et méthionine) et d'autres composés organiques : enzymes, vitamines, huiles de moutarde et essence d'ail. Le soufre participe au métabolisme des composés azotés et des glucides végétaux, il prend part à la respiration, à la synthèse des lipides. Les légumineuses, les crucifères, les solanacées renferment le plus de soufre. Si le soufre manque, les feuilles sont petites et d'une couleur jaune clair, les tiges sont pâles et allongées, la croissance et le développement des plantes se font mal.

Le *fer* entre dans la composition des enzymes oxydo-réducteurs et participe à la synthèse de la chlorophylle, à la respiration et au métabolisme des plantes. Si le fer est en quantité insuffisante (ce qui n'arrive que sur les sols carbonateux), la chlorose frappe les cultures agricoles et les arbres fruitiers, la formation de la chlorophylle étant perturbée. Les feuilles perdent leur couleur verte, puis elles blanchissent et tombent prématurément.

L'influence du *bore* est importante sur le métabolisme des glucides, des protéines et des acides nucléiques, sur plusieurs autres processus biochimiques. Le manque du bore perturbe la circulation des glucides, la formation des organes reproducteurs, la fécondation et la fructification. Le bore n'est pas réutilisé par les plantes, c'est pourquoi quand son taux est faible, ce sont avant tout les jeunes organes en pleine croissance qui souffrent, les points végétatifs meurent.

Les plantes-racines, le tournesol, les légumineuses, les plantes textiles, la pomme de terre et les légumes sont exigeants en bore.

L'insuffisance de bore provoque chez la betterave sucrière, fourragère et de table le brunissement du cœur des racines avec formation de cavités. Chez les plantes textiles, la mort du point végétatif du sommet entraîne une formation surabondante de pousses latérales qui cessent aussi de croître, le rendement et la qualité de la fibre diminuent fortement. Chez le tournesol, une déficience prononcée de bore provoque la mort totale du point végétatif ou, si l'insuffisance se manifeste plus tard, on observe des anomalies de développement des fleurs qui ne forment pas de germes et on constate une baisse de la récolte de graines. Pour les légumineuses, la carence en bore se traduit par une mauvaise formation des nodosités des racines, la fixation symbiotique de l'azote moléculaire atmosphérique diminue, la croissance se ralentit, ainsi que la formation des organes reproducteurs. La pomme de terre est frappée par la gale, les sommets des arbres fruitiers se dessèchent, les fruits se couvrent de tavelures, leurs tissus subissent une subération. En champ, l'insuffisance de bore s'observe le plus souvent sur les sols acides chaulés, les terres marécageuses sombres et les sols engazonnés et à gley.

Le *molybdène* joue un rôle exceptionnel dans la nutrition azotée des plantes. Il participe aux processus de fixation de l'azote moléculaire (par les légumineuses en symbiose avec les bactéries des nodosités des racines et les bactéries nitrifiantes libres du sol) et de réduction des nitrates dans les plantes. Les légumineuses, les cultures potagères, choux de toutes sortes, légumes-feuilles, radis sont extrêmement exigeants envers la présence de molybdène accessible dans le sol. Les signes extérieurs d'insuffisance de molybdène sont les mêmes que ceux de la carence en azote : la croissance des plantes se ralentit fortement et, la synthèse de la chlorophylle étant perturbée, les plantes ont une couleur vert pâle.

Une forte déficience de molybdène freine totalement la formation de nodosités sur les racines des légumineuses, retarde extrêmement la croissance des plantes qui prennent une couleur vert pâle, les limbes des feuilles se déforment, les feuilles tombent prématurément, la récolte baisse considérablement et la teneur des plantes en protéines diminue. La pénurie de molybdène, l'azote étant fourni en excès, peut provoquer l'accumulation dans les plantes, surtout potagères et fourragères, de quantités surabondantes de nitrates toxiques pour les hommes et les animaux. C'est d'ordinaire sur les sols acides et légers que le molybdène manque.

Le *manganèse* entre dans la composition des enzymes oxydo-réducteurs participant à la respiration, la photosynthèse, au métabolisme azoté et à celui des glucides dans les plantes. Il joue un rôle important dans l'assimilation par les plantes de l'azote des nitrates et ammoniacal. Ce sont surtout la betterave et autres plantes-racines, la pomme de terre, les céréales et beaucoup d'arbres fruitiers qui sont sensibles à une insuffisance de manganèse et exigeants envers sa présence dans le sol à l'état assimilable. Le symptôme le plus net du manque de manganèse est que les feuilles entre les nervures sont

ponctuées de chlorose. Sur les limbes, entre les nervures, apparaissent de petites taches jaunes chlorotiques, puis les parties atteintes meurent. L'insuffisance de manganèse se manifeste le plus souvent sur les sols à réaction neutre ou alcaline, surtout légers ou marécageux.

Le *cuivre* entre aussi dans la composition de nombreux enzymes oxydo-réducteurs et participe à la photosynthèse, aux métabolismes des glucides et des protéines. L'insuffisance de cuivre assimilable sur les sols tourbeux-marécageux asséchés à réaction neutre ou alcaline provoque, chez les céréales, la maladie appelée « peste blanche ». Elle se manifeste par un pâlissement brusque et le desséchement de la pointe des feuilles. Les plantes atteintes ne produisent pas ou presque pas d'épis ou de panicules, les inflorescences qui se forment sont stériles ou pauvres en grains. Lorsque le cuivre est en quantité insuffisante, la récolte de grain diminue fortement et si sa carence est extrême, la fructification est totalement absente.

Le *zinc* exerce une action diverse sur les échanges d'énergie et de substances dans les plantes, ce qui est dû à sa présence dans certains enzymes et dans la synthèse des substances de croissance, les auxines. L'insuffisance de zinc refrène fortement la croissance des plantes, perturbe la photosynthèse, la phosphorylation, la synthèse des glucides et des protéines, le métabolisme des composés phénoliques. Le signe spécifique de la carence en zinc est un retard de croissance des entre-nœuds, la chlorose, la petitesse des feuilles, l'apparition de la rosette. Ce sont le plus souvent les arbres fruitiers et les agrumes qui souffrent de la carence en zinc sur des sols neutres ou carbonateux faiblement alcalins, riches en phosphore. Lorsque les arbres sont atteints de la rosette par suite d'une insuffisance de zinc, aux extrémités des jeunes pousses apparaissent de petites feuilles disposées en rosettes. Lorsque le déficit de zinc est très prononcé, les branches meurent et les pousses terminales se dessèchent.

Le *cobalt* est un oligo-élément nécessaire à la fixation biologique de l'azote moléculaire, c'est un des constituants de la vitamine B_{12}. La déficience de cobalt (les signes extérieurs sont analogues à ceux de la carence en azote) peut survenir sur les sols chaulés, neutres ou alcalins et, avant tout, chez les légumineuses. Lorsque le fourrage des animaux est pauvre en cobalt, ils souffrent d'anémie, perdent l'appétit, leur productivité baisse fortement.

Le manque ou l'excès d'autres oligo-éléments causent aussi des maladies de l'homme et du bétail. Un taux réduit de l'iode dans les sols et, par conséquent, dans l'alimentation végétale et les fourrages provoque la strumite; le manque de manganèse, la stérilité; celui de cuivre, l'anémie, le rachitisme; un excès de molybdène, des troubles gastriques, etc.

En pratique agrochimique, il n'est pas nécessaire de régler l'alimentation des plantes en éléments divers d'une façon identique. Les oligo-éléments sont nécessaires aux plantes en faibles quantités. L'exportation de ces éléments par les récoltes ne représente que quel-

ques dizaines ou centaines de grammes à l'hectare et le besoin de ces éléments peut être couvert aux dépens du sol et des engrais, souvent même, les plantes les puisent dans les graines. Cependant, la déficience de certains oligo-éléments se manifeste parfois dans les cultures qui en sont plus exigeantes sur des sols dans lesquels le taux des oligo-éléments assimilables est bas. Dans ce cas, l'utilisation d'engrais qui en contiennent permet d'élever considérablement les récoltes et d'en améliorer la qualité.

Les macroéléments tels que le calcium, le magnésium et le soufre sont contenus dans la plupart des sols en quantités suffisantes pour assurer la nutrition des plantes. En outre, ils sont apportés dans le sol avec les amendements (chaux et plâtre), ainsi qu'avec les engrais organiques et minéraux utilisés.

Afin d'améliorer l'alimentation des cultures agricoles en champ il est souvent nécessaire d'apporter au sol de l'azote, du phosphore, du potassium.

L'exportation totale des éléments nutritifs avec les récoltes et la proportion des éléments consommés varient fortement (tableau 7).

Tableau 7

Exportation approximative des principaux éléments nutritifs avec les récoltes de cultures agricoles

Cultures	Récolte de la production principale, en q/ha	Exportation par la récolte en kg/ha		
		N	P_2O_5	K_2O
Céréales	30-35	90-110	30-40	60-90
Légumineuses à grains	25-30	100-150	35-45	50-80
Pommes de terre	200-250	120-200	40-60	180-300
Betterave sucrière	400-500	180-250	55-80	250-400
Maïs (fourrage)	500-700	150-180	50-60	180-250
Chou	500-700	160-230	65-90	220-320
Cotonnier	30-40	160-220	50-70	180-240

Ceci est dû aux particularités de la composition chimique des plantes, aux fluctuations du niveau de la récolte en formation et aux modifications de sa structure.

La teneur relative en éléments de nutrition minérale dans la production principale et accessoire des différentes cultures agricoles est déterminée, avant tout, par leurs particularités spécifiques, mais dépend aussi de la variété et des conditions de cultivation. La teneur moyenne (en %) des principaux éléments nutritifs dans la récolte de différentes cultures agricoles est donnée au tableau 8. Le taux de l'azote et du phosphore est beaucoup plus élevé dans la partie de la récolte dont la valeur économique est plus grande: grain, racines et tubercules, que dans la paille et les fanes. Quant au potassium, il y en a plus dans la paille et les fanes que dans la partie marchande de la récolte.

Pour donner de bonnes récoltes, le chou, la pomme de terre, la betterave sucrière, le cotonnier, le tournesol, les racines fourragères et les cultures à ensiler exigent beaucoup plus de substances nutritives que les céréales.

L'exportation de substances nutritives du sol par les plantes augmente avec la récolte. Cependant, on n'observe pas souvent de proportionnalité directe entre le volume de la récolte et l'exportation des

Tableau 8

Teneur en azote, en phosphore et en potassium des cultures agricoles

Cultures		Taux des éléments nutritifs		
		N	P_2O_5	K_2O
		en % de la matière sèche		
Blé d'hiver:	grain	2,80	0,85	0,50
	paille	0,45	0,20	0,90
Blé de printemps:	grain	3,40	0,85	0,60
	paille	0,67	0,20	0,75
Seigle d'hiver:	grain	2,20	0,85	0,60
	paille	0,45	0,26	1,00
Orge:	grain	2,10	0,85	0,55
	paille	0,50	0,20	1,00
Mil:	grain	1,85	0,65	0,50
	paille	—	0,18	1,59
Maïs:	grain	1,91	0,57	0,37
	paille	0,75	0,30	1,64
Pois:	grain	4,50	1,00	1,25
	paille	1,40	0,35	0,50
Sarrasin:	grain	1,80	0,57	0,27
	paille	0,80	0,61	2,42
Lin:	graines	4,00	1,35	1,00
	paille	0,62	0,42	0,97
Chanvre:	graines	3,50	1,69	0,94
	paille	0,27	0,21	0,55
Tournesol:	graines	2,61	1,39	0,96
	plante entière	1,56	0,76	5,25
Cotonnier:	graines	3,00	1,10	1,25
	fibres (brutes)	0,34	0,06	0,91
		en % du poids brut		
Pomme de terre:	tubercules	0,32	0,14	0,60
	fanes	0,30	0,10	0,85
Betteraves sucrières:	racines	0,24	0,08	0,25
	fanes	0,35	0,10	0,50
Chou:	têtes	0,33	0,09-0,12	0,27-0,44
Tomates:	fruits	0,26	0,07	0,29-0,36

principaux éléments nutritifs. En principe, quand le rendement est élevé, les dépenses d'éléments nutritifs par unité de production diminuent.

Le taux des éléments nutritifs dans les plantes et leur exportation totale avec la récolte varient fortement suivant les conditions du climat, du sol et de l'agrotechnique.

Dans les récoltes de céréales, les rapports N : P_2O_5 : K_2O varient dans les limites relativement faibles et représentent 2,5-3,0 : 1 : 1,8-2,6. En moyenne, ces cultures consomment 2,8 fois plus d'azote et 2,2 fois plus de potassium que de phosphore (tableau 9).

Tableau 9

Rapports moyens N : P_2O_5 : K_2O dans les récoltes de différentes cultures

Culture	N	P_2O_5	K_2O
Céréales à épis	2,8	1	2,2
Pomme de terre	2,5-3,5	1	4-4,5
Betterave sucrière	2,5-3,5	1	3,5-5,0
Betterave fourragère	3,5-4,5	1	4,5-6,0

Tableau 10

Exportation des principaux éléments nutritifs avec la récolte (en kg pour 10 q de production commercialisée)

Produits agricoles	N	P_2O_5	K_2O
Grain:			
seigle d'hiver	31,0	14,0	26,0
blé d'hiver	37,0	13,0	23,0
blé de printemps	47,0	12,0	18,0
orge	29,0	11,0	20,0
avoine	33,0	14,0	29,0
pois	66,0	16,0	20,0
Fibre de lin	80,0	40,0	70,0
Masse verte du maïs	2,5	1,0	3,5
Racines:			
betterave sucrière	5,9	1,8	7,5
betterave fourragère	4,9	1,5	6,7
turneps	4,8	1,7	5,7
carotte fourragère	5,2	1,9	6,0
rutabaga	5,5	3,1	7,7
carotte potagère	3,2	1,6	5,0
Chou pommé blanc	3,3	1,3	4,4
Tomates	2,6	0,4	3,6
Concombres	1,7	1,4	2,6
Oignons	3,0	1,2	4,0
Tubercules de pomme de terre	6,2	2,0	14,5
Foin:			
trèfle	19,7	5,6	15,0
luzerne	26,0	6,5	15,0
fléole	15,5	7,0	24,0
vesce	22,7	6,2	10,0
foin de pré	17,0	7,0	18,0

La betterave sucrière, les racines fourragères et potagères, la pomme de terre, le tournesol, le chou et certaines autres cultures ont un trait typique, à savoir: ils consomment beaucoup plus de potassium que d'azote et le rapport $N : P_2O_5 : K_2O$ s'exprime pour eux comme suit 2,5-3,5 : 1 : 3,5-5,0. Pour les plantes-racines, les tubercules, le tournesol la structure de la récolte varie fortement suivant les conditions de cultivation. Ceci entraîne de grandes différences dans les quantités d'éléments nutritifs principaux consommées par unité de production marchande et dans les rapports entre eux.

La meilleure assimilation par les plantes des substances nutritives à partir du sol et des engrais apportés s'obtient lorsque les conditions pédoclimatiques sont les plus favorables, que le niveau de l'agrotechnique est élevé et que les engrais sont utilisés à bon escient. On parvient en même temps à une consommation minimale des éléments nutritifs par unité récoltée de la production agricole essentielle.

Les consommations moyennes d'azote, de phosphore, de potassium pour former 10 q de production marchande des principales cultures sont mentionnées au tableau 10. L'application intense de la chimie à l'agriculture provoque un accroissement des récoltes qui s'accompagne d'une plus grande exportation de tous les éléments nutritifs du sol. La production élargie d'engrais complexes concentrés purs entraîne une diminution de l'apport au sol avec les engrais minéraux d'éléments tels que le calcium et le soufre. Il est donc nécessaire de donner au sol, afin d'équilibrer l'alimentation des cultures agricoles, non seulement les principaux éléments nutritifs, azote, phosphore et potassium, mais aussi d'autres macro et oligo-éléments.

LA NUTRITION DES PLANTES

Les plantes supérieures sont des organismes autotrophes, c'est-à-dire elles synthétisent elles-mêmes les substances organiques aux dépens des composés minéraux *, alors que ce qui caractérise les animaux et la grande majorité des micro-organismes, c'est un type d'alimentation hétérotrophe, l'utilisation de substances organiques préalablement synthétisées par d'autres organismes.

La nutrition (alimentation) aérienne des plantes

La photosynthèse est le processus principal de formation des substances organiques dans les plantes. Au cours de la photosynthèse, dans les parties vertes des plantes renfermant de la chlorophylle,

* Ces dernières années, on a démontré qu'en principe les plantes peuvent assimiler directement des composés organiques tels que les vitamines, les antibiotiques, les hormones de croissance, les acides aminés. Cependant, cette assimilation des substances organiques est tout à fait insignifiante et son importance pour l'alimentation des plantes est très limitée.

l'énergie solaire se transforme en énergie chimique utilisée pour la synthèse des glucides à partir du dioxyde de carbone et de l'eau.

Au premier stade (lumineux) du processus de la photosynthèse, il se produit une réaction de décomposition de l'eau dans laquelle l'oxygène se libère, un composé riche en énergie (ATP) se forme, ainsi que des produits réduits. Ces composés participent à la phase suivante (obscure) de la synthèse des glucides et d'autres composés organiques à partir de CO_2.

Dans la formation de glucides simples (hexoses), la réaction globale de la photosynthèse revêt la forme suivante:

$$6CO_2+6H_2O+2874\ kJ \rightarrow C_6H_{12}O_6+6O_2.$$

A partir de ces glucides simples se forment, par des transformations successives, des glucides plus complexes, ainsi que d'autres composés organiques non azotés. Dans les plantes, la synthèse des acides aminés, des protéines et d'autres composés organiques azotés se fait aux dépens des composés minéraux de l'azote (ainsi que du phosphore et du soufre) et des métabolites intermédiaires, produits de la synthèse et de la décomposition des glucides. La formation des diverses substances organiques complexes faisant partie des végétaux se fait aux dépens de l'énergie des liaisons phosphates riches en énergies de l'ATP (et d'autres composés macroergiques), accumulée au cours de la photosynthèse et de l'oxydation, pendant le processus de respiration, des composés organiques préalablement formés.

L'intensité de la photosynthèse et l'accumulation de matière sèche dépend de l'éclairage, du taux du dioxyde de carbone dans l'air, du ravitaillement des plantes en eau et en éléments de nutrition minérale.

Au cours de la photosynthèse, les plantes assimilent l'acide carbonique provenant de l'air à travers les feuilles. Seule une quantité insignifiante de CO_2 (5 % au plus de la consommation totale) peut être absorbée par les racines des plantes. Par leurs feuilles, les plantes peuvent assimiler le soufre sous la forme de SO_2 de l'atmosphère, ainsi que l'azote et les éléments minéraux à partir de solutions aqueuses. Cependant, dans les conditions naturelles, c'est surtout par les feuilles que se fait l'alimentation aérienne, principalement par le carbone, tandis que l'eau, l'azote et les minéraux arrivent dans les plantes par voie radiculaire.

La nutrition (alimentation) radiculaire des plantes

L'azote et les éléments minéraux sont absorbés du sol par la surface active du système radiculaire des plantes sous forme d'ions (anions et cations). Ainsi, l'azote peut être absorbé sous forme d'anion NO_3^- et de cation NH_4^+ (seules les légumineuses peuvent, en symbiose avec les bactéries des nodosités, absorber l'azote atmosphérique moléculaire), le phosphore et le soufre, sous forme d'anions des acides phosphorique et sulfurique, $H_2PO_4^-$ et SO_4^{2-}, le potassium, le cal-

cium, le magnésium, le sodium, le fer sous la forme des cations K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, Fe^{3+}, et les oligo-éléments, sous la forme des anions ou cations correspondants.

Les plantes assimilent les ions non seulement de la solution du sol, mais aussi les ions absorbés par les colloïdes du sol. Bien plus, grâce à la faculté dissolvante des excrétions racinaires renfermant de l'acide carbonique, des acides organiques et des acides aminés, les plantes agissent activement sur la phase solide du sol et font passer à l'état assimilable les substances nutritives nécessaires.

Le système radiculaire des plantes et sa faculté absorbante. La puissance du système radiculaire, sa structure et le caractère de sa répartition dans le sol diffèrent beaucoup selon les espèces.

La morphologie de la racine, la dynamique de la formation du système radiculaire, la puissance de son développement et la profondeur de sa pénétration dans le sol sont déterminées, avant tout, par les particularités biologiques des plantes. Mais, indépendamment de la morphologie et des particularités du développement du système radiculaire, chez toutes les plantes la masse des racines diminue avec la profondeur, tandis que leur surface globale augmente. La partie active du système radiculaire, grâce à laquelle les éléments de l'alimentation minérale sont puisés dans le sol, est représentée par de jeunes radicelles en croissance. Au fur et à mesure de sa croissance, la partie supérieure d'une jeune racine devient subéreuse à l'extérieur et cesse d'absorber les substances nutritives. Les propriétés physiques du sol, la répartition de l'eau et des matières nutritives dans le sol exercent une grande influence sur la vitesse de la croissance et le caractère du développement du système radiculaire.

Dans le sous-sol, un système radiculaire fortement ramifié représente une énorme surface d'absorption dont la valeur varie avec la végétation des plantes, atteignant le plus souvent son maximum à la floraison (tableau 11).

Tableau 11

Variation de superficie occupée par les racines de blé de printemps

Phases de développement	Surface des racines en m² par pied		Rapport de la surface active à la surface inactive
	Totale	Active	
Tallage	9,60	4,91	1,05
Epiaison	29,39	10,87	0,59
Début de la floraison	36,73	17,07	0,86
Fin de la floraison	44,09	24,76	1,30
Maturité physiologique	30,86	14,80	0,92

Pour comprendre le processus de l'absorption des substances nutritives par les plantes, il faut examiner la structure primaire de la racine.

La racine s'accroît par sa pointe protégée par une coiffe. Au voisinage immédiat de l'extrémité des radicelles se trouve une zone de cellules méristématiques en division. Plus haut se trouve la zone d'élongation dans laquelle l'augmentation du volume des cellules et la formation dans celles-ci d'une vacuole centrale s'accompagnent de la différenciation des tissus conducteurs. Dans la zone d'élongation existe la partie descendante déjà formée de l'appareil vasculo-conducteur des plantes, le phloéma, le long duquel se produit la circulation des substances organiques des organes aériens dans la racine. A 1 ou 3 mm de l'extrémité de la racine en croissance est située la zone de formation des poils absorbants. C'est dans cette zone que se termine la formation de la partie ascendante du système conducteur (xylème) qui sert à transporter de l'eau (ainsi que les ions partiellement absorbés et les composés organiques synthétisés dans les racines) de la racine dans la partie aérienne de la plante. La structure primaire de la racine est représentée sur la figure 3.

Les poils absorbants sont de petits prolongements des cellules extérieures de 5 à 72 microns de diamètre et de 80 à 1500 microns de longueur. Le nombre des poils absorbants atteint plusieurs centaines par millimètre carré de surface de la racine dans cette zone. Grâce à la formation des poils absorbants, la surface active du système radiculaire en contact avec le sol, capable d'absorber les substances nutritives augmente des dizaines de fois (tableau 12).

Tableau 12

Développement comparatif des racines et des poils absorbants dans les diverses cultures

Culture	Racines		Poils absorbants		
	Longueur (en m)	Surface (en cm²)	Nombre (en millions)	Longueur (en m)	Surface (en cm²)
Avoine	4,6	316	6,3	743,7	3419
Seigle	6,4	503	12,5	1549,4	7677
Soja	2,9	406	6,1	59,9	277
Paturin des prés	38,4	2129	51,6	5166,3	15806

Remarque : La longueur et la surface des racines et des poils absorbants sont déterminées en champ dans un échantillon du sol prélevé par foreuse de 7,5 cm de diamètre et de 15 cm de hauteur.

Sur toute l'étendue à partir de la pointe de la racine jusqu'à l'extrémité de la zone de formation des poils absorbants, la membrane extérieure cellulosique de la cellule ne porte pas de cuticule et est très perméable. De plus, les membranes des cellules sont traversées de brides de cytoplasme (plasmodesmes) qui réunissent en un seul système le cytoplasme de l'organisme. C'est précisément cette partie de la racine, privée de cuticule, qui prend part à l'absorption de l'eau et des substances nutritives à partir du sol. Dans les zones

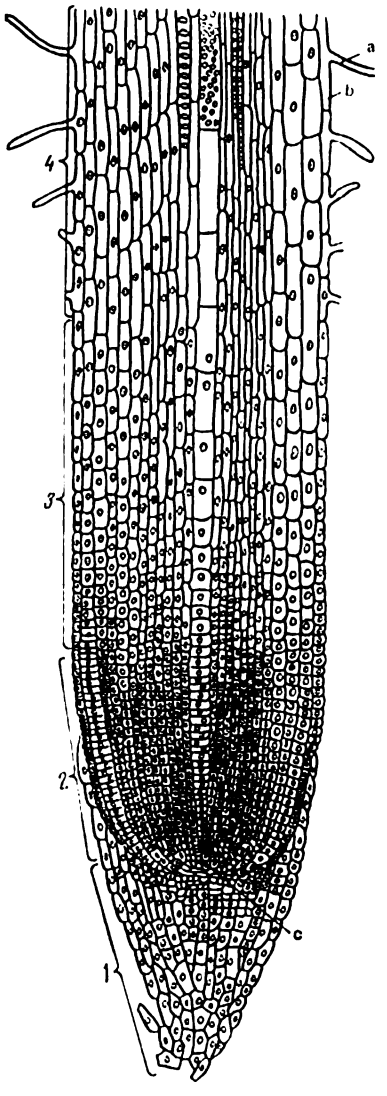


Fig. 3. Structure primaire de la racine (schéma)

1—coiffe; 2—zone des cellules en division; 3—zone d'étirement des cellules; 4—zone de formation des poils absorbants; (*a*—poils absorbants, *b*—épiblème, c—cellules initiales)

de croissance et d'élongation des cellules de la racine, les éléments nutritifs sont assimilés sur place. L'absorption des ions se fait le plus intensément dans la zone de formation des poils absorbants d'où les ions absorbés sont transportés dans les organes aériens des plantes. Soulignons que la racine n'est pas seulement l'organe de l'absorption mais aussi de la synthèse de certains composés organiques, dont les acides aminés et les protéines. Ces dernières sont utilisées pour assurer la croissance du système radiculaire même et, de plus, elles sont partiellement transportées dans les organes aériens de la plante.

A mesure que la racine croît, il se produit un déplacement ininterrompu dans l'espace de la zone d'absorption active dans le sol. On assiste alors à des phénomènes de chimiotropisme consistant en ce que soit le système radiculaire des plantes se développe intensément en direction des réserves des substances nutritives accessibles (chimiotropisme positif), soit sa croissance se refrène dans la zone d'une forte concentration des sels défavorable aux plantes (chimiotropisme négatif). L'insuffisance d'éléments nutritifs assimilables par les végétaux provoque la formation d'une masse de racines relativement plus importante par rapport à celle qui se forme à un haut niveau d'alimentation minérale.

L'influence du système radiculaire s'étend à un vaste volume du sol grâce à la croissance constante des racines et au renouvellement des poils absorbants. Les vieux poils absorbants meurent (la durée de vie de chaque poil absorbant est d'environ 24 heures), de nouveaux se forment sans cesse sur d'autres parties de la racine en croissance. Une fois les poils absorbants morts, la membrane des cellules

subit une subération, elle absorbe moins bien l'eau et les substances nutritives du sol. Chez les plantes annuelles la vitesse de croissance des racines peut atteindre 1 cm par jour. Les jeunes racines qui poussent puisent les ions dans la solution du sol dans un volume de terre d'un rayon d'environ 20 mm alentour et les ions d'échange absorbés dans un rayon de 2 à 8 mm.

Dans la zone de contact direct des poils absorbants avec le sol se renforce l'action dissolvante des excrétions racinaires sur les composés peu solubles du sol. Un contact intime (les poils absorbants se marient avec le sol) assure également une meilleure assimilation par les plantes des ions absorbés par les colloïdes du sol.

L'absorption des substances nutritives par les racines des plantes. Les végétaux absorbent les éléments nutritifs du sol passivement ou activement, le rôle primordial revenant à l'absorption active.

L'absorption passive (non métabolique). Par évaporation de l'eau (transpiration) il se produit dans les cellules des feuilles une force de succion * qui permet aux racines d'absorber l'eau du sol. Les éléments nutritifs sont absorbés avec l'eau à partir de la solution du sol et sont transportés des racines dans les organes aériens par le courant ascendant suivant un système hydrostatique unique constitué par l'espace libre des cellules, communiquant avec l'espace libre du xylème. On entend par espace libre, l'espace des cellules (espaces intercellulaires et pores de la membrane non remplis de cytoplasme vivant et constituant jusqu'à 8 à 10 % du volume de la cellule) dans lequel les éléments minéraux peuvent pénétrer par diffusion sous forme d'ions.

Outre la transpiration, pour l'absorption et le transport de l'eau et des composés minéraux (ainsi que des substances organiques synthétisées dans les racines) par le courant ascendant, c'est la valeur de la pression radiculaire qui joue un rôle important. Les cellules parenchymateuses de l'écorce de la racine pompent activement dans l'appareil vasculo-conducteur, l'eau avec les substances dissoutes créant ainsi une importante pression hydrostatique (de l'ordre de 3 atmosphères). L'absorption passive des éléments nutritifs ne peut se faire que suivant le gradient de concentration, c'est-à-dire d'une plus grande concentration vers une concentration plus basse, et n'exige pas de dépenses d'énergie métabolique. Elle est due à des processus de diffusion et d'osmose et se réalise aux dépens de l'énergie superficielle libre, ainsi que de l'énergie solaire dépensée pour la transpiration.

L'absorption active ou métabolique. Certains éléments nutritifs pénètrent dans les plantes dans un autre rapport que celui qu'ils ont dans la solution du sol. D'autres éléments sont absorbés par les

* La force de succion est due à la différence entre la pression osmotique exercée sur le cytoplasme par des substances du suc cellulaire dissoutes dans l'eau et la pression de turgescence (pression exercée par le liquide à l'intérieur de la cellule sur sa membrane). Plus la plante perd d'eau et plus la pression osmotique dans les feuilles et le système radiculaire est élevée, plus grande est donc la force de succion des plantes.

racines en grande quantité, d'autres encore, en quantité moindre, même s'ils ont la même concentration dans le milieu ambiant. Il est tout à fait clair que l'absorption passive ayant pour base les phénomènes de diffusion et d'osmose ne peut jouer un rôle notable dans la nutrition des plantes qui porte un caractère nettement sélectif.

L'absorption des éléments nutritifs par les plantes se fait contre le gradient de concentration. La concentration des ions dans le suc cellulaire, de même que dans la sève brute des plantes (transportée des racines vers les organes aériens le long du xylème) est beaucoup plus élevée que dans la solution du sol.

L'absorption des substances nutritives par les racines et leur circulation dans la plante se fait à une vitesse de presque 100 fois supérieure à celle qui serait possible par diffusion et osmose. Ce fait a été démontré dans des recherches effectuées par la méthode des atomes marqués.

On sait aussi qu'il n'y a pas de dépendance directe entre l'absorption des substances nutritives par les racines et l'intensité de la transpiration, la quantité d'eau absorbée et évaporée.

Tout ceci confirme indubitablement que l'absorption des substances nutritives par les plantes ne se fait pas simplement par absorption passive de la solution du sol et des sels qu'elle contient par les racines, c'est un processus physiologique actif, inséparable de l'activité vitale des racines et des organes aériens des plantes, de la photosynthèse, de la respiration et du métabolisme et qui exige nécessairement une dépense d'énergie.

La première structure de la cellule, que les substances absorbées rencontrent sur leur voie, c'est sa membrane. Grâce à la présence de pores assez gros, la membrane cellulaire n'offre pas d'obstacles à la pénétration des ions. Les parois pectino-cellulosiques de la cellule ont une grande capacité d'absorption, grâce à quoi sur la face interne de la membrane peuvent se réaliser les processus de concentration des ions provenant de la solution du sol. Quand la réaction du milieu change (par dégagement de l'acide carbonique au cours de la respiration et d'autres excrétions racinaires) les ions adsorbés peuvent se libérer, pénétrer dans l'espace libre des cellules de la racine et s'adsorber sur la face externe du cytoplasme.

Le protoplaste de chaque cellule a, à sa surface, une très mince pellicule de démarcation, la membrane lipido-protéique. Cette membrane cytoplasmique est constituée par des composés comprenant un grand nombre de groupes fonctionnels et certaines de ses parties ont une charge positive ou négative. C'est sur ces parties de la face externe du cytoplasme que peut se produire simultanément l'adsorption des anions et des cations à partir de la solution.

L'adsorption des ions à la surface de la membrane cytoplasmique est métabolique et se fait contre le gradient de la concentration. Le fonds métabolique des cations et des anions dans les plantes peut être constitué par les ions H^+ et OH^-, ainsi que H^+ et HCO_3^-, formés par dissociation de l'acide carbonique libéré au cours de la respiration.

Les cations et les anions adsorbés sur la face externe du cytoplasme pénètrent dans la cellule par la membrane à l'aide de vecteurs spéciaux de nature protéique. Le transfert des ions à travers la membrane contre le gradient de concentration et le gradient électrochimique exige des dépenses d'énergie. C'est pour cette raison que le rôle essentiel dans le fonctionnement des vecteurs appartient à l'ATP.

L'énergie de l'ATP est utilisée pour la synthèse primitive de la protéine-vecteur, pour l'interaction entre le vecteur et la substance absorbée, la réalisation de l'acte même du transport de substance à travers la membrane, la désintégration du complexe et la libération de la substance absorbée, enfin, pour la rénovation du vecteur. Le transport actif des cations dans la cellule à travers la membrane peut s'accompagner d'un transport en sens contraire vers l'extérieur d'ions H^+, Na^+, Ca^{2+} et d'autres cations se trouvant fonctionnellement en excès à l'intérieur de la cellule. Par exemple, un faible taux de sodium et un taux élevé de potassium dans les tissus des animaux et de certains halophytes sont déterminés par l'association d'un transport actif de potassium vers l'intérieur de la cellule à un flux de sodium en direction de l'extérieur. L'excès à l'intérieur de la cellule d'ions sodium, nécessaire au fonctionnement de cette pompe à potassium-sodium, est créé aux dépens de sa diffusion passive suivant le gradient de concentration.

Le pompage actif des cations à partir des cellules racinaires assure l'apparition sur la face interne de la membrane d'un potentiel électrique de l'ordre de 50 mV, alors que les cellules de l'écorce racinaire ont, par rapport à la solution extérieure, un potentiel plus élevé, de l'ordre de 130 mV. Ceci permet aux anions de pénétrer à travers la membrane par le gradient électrochimique.

La membrane cytoplasmique n'est pas seulement une barrière sur la voie de l'absorption des ions par la cellule, c'est sa composante la plus active par laquelle les ions sont entraînés dans les processus du métabolisme. Les ions peuvent traverser la membrane grâce à la présence dans sa structure de protéines contractiles à structure variable. Les protéines contractiles participent aussi, de toute évidence, à la pinocytose *, à la capture de gouttes de la solution entourant la cellule par excroissance ou incurvation à l'intérieur dans la couche limite du protoplasme, ainsi qu'en attirant à l'intérieur de la cellule, par formation de canaux et de plis, la surface de la membrane avec les ions adsorbés.

La première étape de l'absorption des substances nutritives par les racines à partir de la solution du sol, adsorption des ions sur la surface absorbante de la racine, se renouvelle sans cesse étant donné

---

* Il a été prouvé, ces dernières années, que le phénomène de la pinocytose, propre aux protistes, pouvait être un des moyens d'absorption des substances nutritives par les végétaux également ; cependant, on n'a pas encore de données quant à l'échelle à laquelle se manifeste ce phénomène.

que les ions adsorbés se déplacent continuellement vers l'intérieur des cellules de la racine.

Les ions arrivés dans la cellule se déplacent soit inchangés, soit déjà sous la forme de composés organiques de transport synthétisés dans les racines, vers les organes aériens, tiges et feuilles, vers les endroits où leur assimilation se fait avec le plus d'intensité.

La circulation des substances d'une cellule dans une autre se fait suivant les plasmodesmes réunissant le cytoplasme des cellules végétales en un système unique, le symplaste. En circulant dans le symplaste, une partie des ions et des métabolites peuvent accéder dans l'espace libre et suivre ensuite passivement le flux d'eau vers les lieux d'assimilation. Ensuite, s'ils ne sont pas complètement dépensés dans les processus du métabolisme, ils se transporteront de nouveau suivant le système de transport actif.

L'absorption par les racines et le transport des substances nutritives sont étroitement reliés aux processus du métabolisme et d'échange d'énergie dans les végétaux, à l'activité vitale et à la croissance, tant des organes aériens que des racines mêmes.

La respiration est une source d'énergie nécessaire à l'absorption active des éléments de la nutrition minérale. C'est ce qui conditionne le lien étroit entre l'intensité de l'absorption par les plantes des éléments nutritifs et l'intensité de la respiration des racines. Lorsque la croissance des racines est freinée et la respiration inhibée (par insuffisance d'oxygène quand l'aération est mauvaise ou le sol gorgé d'eau), l'absorption des substances nutritives est fortement limitée.

Pour une croissance et une respiration normales des racines, il est nécessaire qu'il existe un afflux ininterrompu vers elles de matériel énergétique, produits de la photosynthèse (des glucides et d'autres composés organiques) venant des organes aériens. Lorsque la photosynthèse s'affaiblit, la formation et la circulation des produits assimilés dans les racines diminuent, ce qui fait que leur activité vitale, ainsi que l'absorption des substances nutritives à partir du sol baissent.

Les ions des sels minéraux absorbés par les plantes participent déjà au métabolisme dans les cellules de la racine, sont fixés par ses structures cellulaires ou sont directement transportés dans les organes aériens. Les nitrates (NO_3^-), par exemple, peuvent déjà se réduire jusqu'à l'ammoniaque dans la zone d'absorption même, où se forment les acides aminés par amination des céto-acides organiques provenant des organes aériens par le phloème. Les acides aminés synthétisés dans la racine sont en partie utilisés pour la synthèse des protéines fonctionnelles et structurales dans le système radiculaire même. Le transport de l'azote des racines vers les organes aériens se fait, soit sous la forme NO_3^- ou NH_4^+, soit sous celle d'acides aminés et de peptides, produits intermédiaires de la synthèse des protéines à masse moléculaire basse.

Des ions tels que K^+, Ca^{2+}, Na^+ et autres, ne font pas partie de composés organiques quelconques dans la plante, mais forment avec

le cytoplasme des complexes d'adsorption instables, labiles. Ces ions peuvent se libérer aisément de ces composés instables et même se dégager des tissus végétaux dans la solution environnante par exosmose. D'autres ions (tels que NH_4^+, $H_2PO_4^-$, SO_4^{2-}) prennent directement part à la synthèse de substances organiques: acides aminés, protéines, acides nucléiques, phosphatides, etc. Ces ions forment des composés stables, d'où leur fixation solide avec les végétaux. L'assimilation des ions de sels minéraux avec formation de composés organiques ou de complexes d'adsorption instables avec le cytoplasme détermine un apport continu des substances nutritives dans la plante. Les recherches des dernières années ont révélé l'existence d'un rythme nycthéméral déterminé dans l'absorption des cations et des anions par le système radiculaire, reflétant l'alternance de phases successives d'excitation et d'inhibition dans l'activité vitale des plantes.

L'absorption sélective d'ions par les plantes. La réaction physiologique des sels. Les différents éléments de la nutrition ne sont pas utilisés de façon identique au cours du métabolisme intracellulaire dans la plante pour la synthèse des substances organiques et la formation de nouveaux organes et tissus. Ce fait détermine l'inégalité dans l'accès des divers ions dans les racines, leur absorption sélective par les plantes. Il parvient du sol dans la plante plus d'ions nécessaires à la synthèse de substances organiques, à la formation de cellules, tissus et organes nouveaux.

Si NH_4Cl est présent dans la solution, les plantes absorberont plus intensément et en plus grande quantité (en échange d'ions hydrogène) les cations NH_4^+, étant donné qu'ils sont utilisés pour la synthèse des acides aminés, et, ensuite, des protéines. En même temps, les ions Cl^- sont nécessaires aux végétaux en petite quantité, aussi leur absorption sera-t-elle limitée. Dans ce cas, les ions H^+ et Cl^- (acide chlorhydrique) s'accumuleront dans la solution du sol et l'acidifieront.

Si c'est $NaNO_3$ qui est présent dans la solution, la plante absorbera davantage et plus rapidement les anions NO_3^- en échange des anions HCO_3^-. Les ions Na^+ et HCO_3^- ($NaHCO_3$) s'accumuleront dans la solution qui deviendra alcaline.

L'absorption sélective par les plantes des cations et des anions à partir du sel détermine son acidité ou son alcalinité physiologiques.

Les sels à partir desquels l'anion est absorbé en plus grande quantité que le cation [$NaNO_3$, KNO_3, $Ca(NO_3)_2$] après quoi la solution devient alcaline sont physiologiquement alcalins.

Les sels dont le cation est absorbé par les plantes en plus grande quantité que l'anion [NH_4Cl, $(NH_4)_2SO_4$, $(NH_4)_2CO_3$, KCl, K_2SO_4], après quoi la solution devient acide sont physiologiquement acides.

Afin de ne pas rendre plus mauvaises les conditions de croissance et de développement des plantes cultivées, surtout sur les sols peu tamponnés il faut tenir compte de la réaction physiologique des sels utilisés comme engrais chimiques.

INFLUENCE DU MILIEU EXTÉRIEUR SUR L'ABSORPTION DES SUBSTANCES NUTRITIVES PAR LA PLANTE

L'absorption par la plante des substances nutritives dépend en grande partie des propriétés du sol, de la réaction et de la concentration de la solution du sol, de la température, de l'aération, de l'humidité, de la présence dans le sol de formes assimilables de substances nutritives, de la durée et de l'intensité de l'éclairage et d'autres conditions du milieu ambiant. Le cheminement dans la plante de substances nutritives diminue nettement quand l'aération du sol est mauvaise, à basse température, en présence d'excès ou de manque d'eau dans le sol. Une influence particulièrement prononcée sur le cheminement des substances nutritives est exercée par la réaction de la solution du sol, la concentration et le rapport des sels dans celle-ci. Quand la concentration des sels dans la solution du sol est excessive (par exemple, dans les sols salés), l'absorption d'eau et de substances nutritives se trouve fortement ralentie.

Les racines des plantes ont une très grande faculté d'assimilation et peuvent absorber les substances nutritives à partir des solutions très diluées. La plupart des plantes peuvent se développer normalement avec une teneur en N et K_2O de 20 à 30 mg et en P_2O_5 de 10 à 15 mg par litre et même à une concentration beaucoup plus faible si elle est continuellement renouvelée.

Ce qui est aussi important pour le développement normal des racines, c'est le rapport entre les sels dans la solution, son *équilibre physiologique*. On dit d'une solution qu'elle est physiologiquement équilibrée si les diverses substances s'y trouvent dans des rapports tels que leur utilisation par la plante est la plus efficace. Une solution constituée d'un sel unique quelconque n'est pas équilibrée physiologiquement.

La prédominance (la haute concentration) d'un sel dans la solution, surtout l'excès d'un cation monovalent quelconque est nocive pour la plante. Le développement des racines se fait mieux dans une solution de plusieurs sels. L'*antagonisme* des sels qui s'y manifeste, fait que chaque ion empêche réciproquement le cheminement excédentaire d'un autre ion dans les cellules de la racine. Par exemple, Ca^{2+}, en fortes concentrations, freine l'arrivée excédentaire des ions K^+, Na^+ ou Mg^{2+} et inversement. Des rapports antagonistes de ce genre existent pour les ions K^+ et Na^+, K^+ et NH_4^+, K^+ et Mg^{2+}, NO_3^- et $H_2PO_4^-$, Cl^- et $H_2PO_4^-$, etc.

L'antagonisme est bien plus manifeste entre les ions de même charge et si la concentration d'un ion dans la solution dépasse fortement celle d'un autre ion. L'équilibre physiologique se rétablit de la meilleure façon si l'on introduit dans la solution des sels de calcium. La présence de calcium dans la solution crée des conditions normales pour le développement du système radiculaire, c'est pourquoi dans les mélanges nutritifs artificiels le cation calcium doit prévaloir sur les autres ions.

Le développement des racines et l'absorption de substances nutritives sont particulièrement défavorisés par une haute concentration d'ions hydrogène, c'est-à-dire quand la solution est fortement acide. Une haute concentration d'ions hydrogène dans la solution exerce une influence néfaste sur l'état physico-chimique du protoplasme des cellules racinaires. Les cellules externes de la racine deviennent gluantes, elles perdent leur perméabilité et la faculté d'absorber les substances nutritives. L'action défavorable de la réaction acide se manifeste surtout en l'absence ou dans l'insuffisance d'autres cations, surtout de cation calcium dans la solution. Le calcium freine le cheminement d'ions H^+, c'est pourquoi, quand le calcium est en excès, les plantes peuvent supporter une réaction plus acide que sans calcium (tableau 13).

Tableau 13

Influence de $CaCl_2$ sur la croissance des racines de blé pour une acidité différente de la solution

Variantes d'expériences	Longueur moyenne des racines (en mm) pour pH				
	5,3	4,9	4,7	4,3	4,0
sans $CaCl_2$	25	29	24	3	0
avec $CaCl_2$	64	64	70	67	48

La réaction de la solution influe sur l'intensité avec laquelle les ions pénètrent dans la plante et participent au métabolisme. Quand la réaction est acide (c'est-à-dire lorsque la concentration des ions hydrogène est plus importante) les anions sont absorbés en plus grande quantité, mais l'arrivée des cations est limitée; l'alimentation des plantes en calcium et en magnésium se trouve perturbée, la synthèse des protéines freinée et la formation des sucres dans la plante est stoppée. Quand la réaction est alcaline, l'absorption des cations est stimulée et celle des anions ralentie.

La principale réserve des substances nutritives se trouve dans le sol à l'état adsorbé par les colloïdes et sous la forme de composés divers peu solubles. Pour que ces derniers soient assimilables, il faut que les racines exercent une action énergique sur la phase solide du sol et qu'un contact étroit existe entre les racines et les particules du sol. La surface absorbante des racines et leur contact avec le sol sont fortement augmentés par le développement d'un très grand nombre de poils absorbants sans cesse renouvelés dans la période de croissance du végétal. Au cours de la vie des plantes, les racines excrètent dans le milieu environnant l'acide carbonique et certains acides organiques ainsi que des enzymes et d'autres substances organiques. Sous l'influence des acides organiques et de l'acide carbonique libérés par les racines, dont la concentration est particulièrement élevée dans la zone de contact direct entre les racines et les particules

du sol, les composés minéraux peu solubles du phosphore, du potassium et du calcium qu'il renferme se dissolvent et les ions passent de l'état absorbé dans la solution. La faculté qu'ont les racines d'absorber les ions fixés par les colloïdes du sol a été montrée de façon probante par des expériences de simulation sur une culture de plantes en suspension de minéraux argileux et de résines synthétiques d'échange ionique saturées d'ions divers, sans aucun apport de sels minéraux. Sous l'influence des enzymes libérés par les racines le phosphore, par exemple, se dégage de ses composés organiques.

Les substances nutritives sont le plus activement absorbées par les plantes dans la partie du sol en contact direct avec les racines. C'est pourquoi toutes les mesures entreprises pour améliorer le développement des racines (bon travail de la terre, chaulage des sols acides, etc.) assurent, en même temps, une meilleure assimilation par les plantes des substances nutritives du sol.

LE RÔLE DES MICRO-ORGANISMES DANS LA NUTRITION DES PLANTES

L'alimentation des plantes se réalise dans une interaction étroite avec le milieu ambiant, entre autres, avec une multitude de microorganismes du sol de toutes espèces. Il y a surtout un grand nombre de microorganismes dans la partie du sol en contact immédiat avec la surface des racines (rhizosphère). Utilisant comme aliment et comme source d'énergie les excrétions racinaires, les microorganismes se développent activement sur les racines et à leur proximité et favorisent la mobilisation des substances nutritives du sol.

Les micro-organismes du sol et de la rhizosphère jouent un rôle très important dans la transformation des substances nutritives du sol et des engrais. Ils désagrègent les substances organiques du sol et les engrais organiques, si bien que les éléments nutritifs de ceux-ci (azote, phosphore, soufre, etc.) passent sous une forme minérale, assimilable par les plantes. Certains micro-organismes sont capables de décomposer les composés minéraux peu solubles de phosphore et de calcium et de les faire passer sous une forme assimilable pour les végétaux. Certaines bactéries fixent l'azote atmosphérique moléculaire et enrichissent ainsi le sol en azote. La formation de l'humus est également liée à l'activité vitale de microorganismes.

Dans certaines conditions, l'activité des micro-organismes peut nuire à la nutrition et à la croissance des plantes. Pour s'alimenter et se former, les microorganismes consomment de l'azote et des éléments minéraux, c'est-à-dire qu'ils sont des concurrents des plantes dans l'utilisation des minéraux. La fixation des substances nutritives par les bactéries porte un caractère temporaire, car, après leur mort, les éléments nutritifs peuvent se libérer sous une forme minérale et être réutilisés par les végétaux. Mais, parfois, la fixation est si forte qu'elle influe défavorablement sur l'alimentation végétale. Examinons le cas où une grande quantité de substance organique

fraîche, riche en cellulose, mais pauvre en azote (paille, paille de fumier) est incorporée au sol. Ayant reçu une source de matériel énergétique, les bactéries prolifèrent rapidement et consomment intensément les composés minéraux azotés du sol, fixant l'azote sous une forme organique. Le résultat en est une nutrition azotée défectueuse des plantes et une baisse de la récolte. La minéralisation de l'azote antérieurement fixé se fait très lentement.

Mais pas tous les micro-organismes sont utiles aux plantes. Certains dégagent des substances toxiques pour les plantes ou sont pathogènes. Il y a également, dans le sol, des microorganismes qui réduisent les nitrates jusqu'à l'azote moléculaire (bactéries dénitrifiantes) et provoquent des pertes considérables d'azote gazeux à partir du sol.

Il en résulte qu'une des grandes tâches de l'agriculture est de trouver des procédés agrotechniques créant des conditions favorables au développement des bactéries utiles et des conditions défavorables au développement des bactéries nuisibles.

ATTITUDES DES PLANTES ENVERS LES CONDITIONS DE NUTRITION DANS LES DIFFÉRENTES PÉRIODES DE LEUR CROISSANCE

Aux différentes périodes de leur croissance, les plantes ne présentent pas les mêmes exigences aux conditions du milieu extérieur et, entre autres, aux conditions de l'alimentation. L'absorption d'azote, de phosphore, de potassium et d'autres substances nutritives varie au cours de la végétation.

On doit distinguer les notions de période critique de l'alimentation (quand les quantités consommées peuvent être limitées, mais où l'insuffisance d'éléments nutritifs a une répercussion néfaste sur la croissance et le développement des plantes) et de période de consommation maximale, caractérisée par la plus forte absorption de substances nutritives.

Examinons d'abord les lois générales de consommation des substances nutritives par les plantes au cours de la végétation. Au début de leur développement, les plantes consomment des quantités relativement minimes de toutes les substances nutritives, mais elles sont très sensibles à leur insuffisance comme à leur excès dans la solution. Par conséquent, à cette période, dans la rhizosphère, les substances nutritives doivent se trouver sous une forme aisément soluble, mais leur concentration ne doit pas être élevée, le phosphore devant prévaloir sur l'azote et le potassium. Le début de la croissance est critique en ce qui concerne l'alimentation en phosphore. A ce moment, une insuffisance de phosphore réprime tellement la croissance des plantes que la récolte baisse fortement, même si le phosphore est donné en abondance aux périodes suivantes (tableau 14). Etant donnée la grande intensité des processus synthétiques, le système radiculaire étant encore très faible, les jeunes plantes sont

très exigeantes envers les conditions d'alimentation. Il importe donc, pour la constitution de la récolte, d'assurer dès le début de la végétation un niveau suffisamment élevé de ravitaillement en tous les éléments. Ainsi, pour les céréales, dès l'apparition des trois ou quatre premières feuilles, commencent la formation et la différenciation des organes reproducteurs, épis ou panicules. A cette période,

Tableau 14

Influence de l'alimentation périodique des plantes en phosphore sur la récolte (expérience de végétation sur l'orge)

Conditions d'alimentation	Récolte (en %)	
	Totale	Grain
Alimentation normale en phosphore à toutes les périodes	100	100
Les plantes n'ont pas reçu de phosphore au cours des 15 premiers jours	17,4	0
Plantes sans phosphore entre 45 et 60 jours de croissance	102	104

un manque d'azote, même si par la suite, l'alimentation en azote est renforcée, entraîne une diminution du nombre des épillets dans la panicule ou l'épi et une baisse de la récolte.

Les quantités d'éléments nutritifs consommés par les plantes augmentent fortement dans la période de croissance intense des organes aériens, tiges et feuilles. Les rythmes d'accumulation de la matière sèche peuvent anticiper sur l'apport de substances nutritives et leur taux relatif dans les plantes s'abaisse en comparaison de la période précédente. C'est à l'azote que revient le rôle primordial dans les processus de croissance. Une forte alimentation azotée favorise la croissance des organes végétatifs, la formation d'un puissant appareil d'assimilation, tandis qu'une insuffisance d'azote réprime la croissance et fait baisser par la suite la récolte et sa qualité.

Au moment de la floraison et au début de la fructification la plupart des plantes ont besoin de moins d'azote, mais de plus de phosphore et de potassium. Ceci s'explique par le rôle physiologique de ces éléments, leur participation à la synthèse et à la circulation des composés organiques, aux échanges d'énergie, particulièrement intenses au moment de la formation des organes reproducteurs et de l'emmagasinement de réserves dans la partie marchande de la récolte.

A la fructification, lorsque s'achève la croissance de la masse végétative, la consommation de toutes les substances nutritives diminue graduellement pour s'arrêter ensuite totalement. Par la suite, la formation de matière organique et les autres processus vi-

taux sont principalement assurés aux dépens de la *réutilisation* des substances nutritives emmagasinées auparavant dans la plante.

Les diverses cultures agricoles se distinguent par le volume et l'intensité de la consommation d'éléments nutritifs au cours de la végétation. Toutes les céréales (sauf le maïs), le lin, le chanvre, la pomme de terre primeur, certaines cultures potagères se distinguent par une courte période d'alimentation intense. Ces plantes consomment la plus grande partie des substances nutritives en de brefs délais. Par exemple, les céréales d'hiver absorbent, pendant l'automne seulement, 25 à 30 % de toute la quantité des substances nutritives alors que durant la même période la masse de la matière sèche des plantes n'atteint en tout que les 10 % de la récolte finale.

En un délai relativement bref, de la levée à l'épiaison, le blé de printemps consomme de 2/3 à 3/4 de la quantité globale de substances nutritives absorbées.

Les variétés demi-tardives et tardives de pommes de terre consomment en juillet la plus grande partie des substances nutritives totalement absorbées : au cours de ce mois, près de 40 % de l'azote, plus de 50 % du phosphore et 60 % du potassium finalement contenus dans la récolte. Les pommes de terre hâtives ont un délai de consommation intense encore plus bref.

Pour le lin, la période de consommation maximale d'éléments minéraux est bien déterminée : depuis la phase de la formation des boutons jusqu'à celle de la floraison ; quant au cotonnier, il consomme la plus grande partie des substances nutritives du début de la formation des boutons jusqu'à la formation massive de fibre dans les capsules.

Certaines plantes, le maïs, le tournesol, la betterave sucrière, etc. ont une période de consommation des substances nutritives plus étalée, elles les absorbent presque jusqu'à la fin de la végétation.

Certains éléments nutritifs sont absorbés par les plantes avec une intensité variée : pour le maïs, par exemple, c'est la consommation de potassium qui se fait le plus rapidement, puis celle de l'azote ; le phosphore est absorbé beaucoup plus lentement. L'absorption du potassium s'achève entièrement à la période de formation des panicules ; celle de l'azote, à la période de formation du grain. L'absorption du phosphore est beaucoup plus étalée et dure jusqu'à la fin de la végétation.

Le chanvre absorbe l'azote et le potassium d'une façon intense durant le premier mois de sa croissance. L'arrivée de l'azote s'arrête totalement dans les trois et du potassium dans les cinq semaines qui suivent l'apparition des pousses, alors que l'assimilation intense du phosphore se poursuit jusqu'à la fin de la végétation.

La consommation des principaux éléments nutritifs par la betterave sucrière se fait aussi de façon irrégulière. Dans la première décade qui suit la levée, le rapport P :N :K dans les plantes est de 1,0 :1,5 :1,4. Ensuite, dans la période de croissance intense des feuilles, ce rapport se modifie dans le sens d'une augmentation de la

consommation de l'azote et du potassium et représente en mai, 1:2,5:3; en juin, 1,0:3,0:3,5; en juillet, 1:4:4. Dans la période de formation des racines et d'emmagasinement du sucre, le rapport entre ces éléments devient 1,0:3,6:5,5, c'est-à-dire que l'absorption du potassium augmente fortement. Dans la période de formation de la racine et de mise en réserve du sucre, une alimentation azotée trop abondante est indésirable, car elle stimule la croissance des fanes au détriment de celles de la racine et des réserves de sucre. Ce qui importe à ce moment, c'est de ravitailler les plantes en potassium et en phosphore.

Pour la mise au point d'un système de fumure il faut tenir compte de cette irrégularité dans le besoin quantitatif et l'intensité de la consommation par les plantes de divers éléments nutritifs. Il importe surtout d'assurer des conditions alimentaires favorables pour les plantes, depuis le début de la végétation et dans les périodes où elles consomment le plus. On y parvient en combinant différentes méthodes d'apport d'engrais: dans la fumure de base avant les semis, au moment des semis et, plus tard, en fumure d'appoint. La tâche de la fumure de base est d'assurer à la plante sa nutrition pendant toute la végétation, c'est pourquoi, dans la plupart des cas, on fournit, avant les semis, la norme complète d'engrais organiques et la plus grande partie des engrais chimiques. La fumure au moment des semis (en lignes, en poquets ou en carrés) est apportée afin de donner à la plante, au début de son développement, des substances nutritives facilement assimilables et, avant tout, du phosphore. Afin de fournir aux plantes les éléments nutritifs aux périodes les plus critiques de la végétation, on recourt à des fumures d'appoint en complément de la fumure de fond et de la fumure au semis (dans certains cas, cette fumure d'appoint peut comprendre une bonne partie de la norme d'engrais, par exemple, l'azote pour le cotonnier, etc.). Le choix du moment et du procédé de fumure, de l'enfouissage des engrais dans le sol dépend non seulement des particularités de la biologie, de l'alimentation et de l'agrotechnique des cultures, mais aussi des conditions pédoclimatiques, ainsi que du genre d'engrais employé et de sa forme.

La régulation par la fumure de l'alimentation des plantes selon leur période de croissance et en accord avec leurs besoins permet de régler correctement le volume et la qualité de la récolte.

CHAPITRE 2

LES PROPRIÉTÉS AGROCHIMIQUES DU SOL EN RAPPORT AVEC LA NUTRITION DES PLANTES ET L'EMPLOI D'ENGRAIS

Pour bien fumer les terres, il importe non seulement de tenir compte des besoins des plantes en éléments nutritifs aux différentes phases de leur croissance, mais aussi de connaître la composition chimique, les propriétés biologiques, physico-chimiques et chimiques du sol qui déterminent sa fertilité et le caractère des transformations qu'y subissent les engrais apportés.

LA COMPOSITION DU SOL

Le sol est un système multiphase, il se compose de phases solide, liquide (solution du sol) et gazeuse (air du sol).

L'**air du sol** occupe ordinairement 1/4-1/3 du volume de la couche supérieure arable du sol à humidité normale. Il se distingue de l'air atmosphérique par un taux plus élevé de dioxyde de carbone (en moyenne environ 1 %) et un taux moins élevé d'oxygène. La composition de l'air du sol dépend de la granulométrie et de la structure du sol, de sa porosité, de la présence et du caractère de la végétation, de l'intensité des échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère, des variations de température et de pression atmosphérique. La formation de dioxyde de carbone dans le sol résulte de la décomposition de la matière organique par des micro-organismes et de la respiration des racines. Le dioxyde de carbone formé dans le sol se dégage en partie dans l'atmosphère et se dissout partiellement dans la solution du sol. Quand le sol est gorgé d'eau et l'aération mauvaise, le taux de l'acide carbonique s'élève et celui de l'oxygène baisse, ce qui nuit au développement des plantes et des micro-organismes.

La **solution du sol** est la partie la plus mobile, la plus variable, la plus active du sol. Son rôle est important pour la formation du sol et sa fertilité. Pour les plantes, la phase liquide est la source directe d'eau et de substances nutritives. La composition et la concentration de la solution du sol varient sous l'influence de divers processus biologiques, chimiques, physiques et physico-chimiques. Entre les phases liquide, solide et gazeuse il s'établit constamment un équilibre dynamique mobile. L'apport de sels dans la solution du sol dépend de la marche des processus d'érosion et de désintégra-

tion des minéraux, de la dégradation de la matière organique du sol, de l'apport d'engrais organiques et minéraux.

La concentration de la solution du sol des terrains non salés n'est pas élevée et varie entre quelques décigrammes et quelques grammes par litre. Dans les terres salées, le taux des substances dissoutes atteint des dizaines et même des centaines de grammes par litre.

La solution du sol renferme des substances minérales et organiques, des composés organo-minéraux, ainsi que des gaz dissous, dioxyde de carbone, oxygène, ammoniac, etc. Parmi les composés minéraux, on rencontre dans la solution du sol les anions HCO_3^-, Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}, $H_2PO_4^-$ et les cations Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, NH_4^+, K^+. Le fer et l'aluminium s'y trouvent surtout sous la forme de complexes stables avec la matière organique et dans les sols acides, sous forme de cations. C'est la présence et le renouvellement permanent dans la solution du sol d'ions K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, NH_4^+, NO_3^-, SO_4^{2-} et $H_2PO_4^-$ qui ont le plus d'importance pour l'alimentation des plantes.

Le rapport entre les constituants minéraux, organiques et organo-minéraux de la solution du sol résulte de l'action de nombreux facteurs, surtout du type de sol et du degré de sa salure. Une partie des substances (de 1/4 à 1/10 et moins de celles contenues dans la solution du sol) peut se trouver sous la forme colloïdale. Outre les composés organiques et organo-minéraux on rencontre aussi, à l'état colloïdal, l'acide silicique, des sesquioxydes de fer et d'aluminium.

La pression osmotique de la solution du sol et l'absorption de l'eau par les racines dépendent de la concentration et du degré de dissociation des substances dissoutes. La pression osmotique de la solution du sol est beaucoup plus basse que celle du suc cellulaire des plantes. Sur les sols salés d'une forte pression osmotique l'absorption de l'eau par les plantes cultivées est impossible et, dans ces conditions, seules poussent les plantes sauvages dont la pression osmotique du suc cellulaire est très élevée.

La concentration des sels et la pression osmotique de la solution du sol sont fonction de l'humidité du sol et représentent des grandeurs très dynamiques.

Comme nous l'avons déjà vu, la réaction de la solution du sol est d'une très grande importance pour l'alimentation des plantes.

La **phase solide du sol** comprend une partie minérale et une partie organique.

Environ la moitié de la phase solide est constituée par l'oxygène; un tiers, par le silicium; plus de 10 %, par l'aluminium et le fer, les autres éléments ne représentent que 7 % (tableau 15). En comparaison de la lithosphère (enveloppe solide de l'écorce terrestre) le sol contient 20 fois plus de carbone et 10 fois plus d'azote, ce qui résulte de la vie des organismes. L'érosion et la formation du sol s'accompagnent d'une élévation relative (en comparaison de la composition élémentaire de la lithosphère) du taux de l'oxygène, de l'hy-

drogène et du silicium dans le sol et d'une diminution du taux de l'aluminium, du fer, du calcium, du magnésium, du sodium, du potassium et de plusieurs autres éléments. L'azote est presque entièrement compris dans la partie organique du sol; le carbone, le phosphore, le soufre, l'oxygène et l'hydrogène aussi bien dans la partie

Tableau 15

Composition chimique moyenne (élémentaire) de la phase solide du sol

Elément	%	Elément	%	Elément	%
Oxygène	49,0	Baryum	0,05	Gallium	(10^{-3})
Silicium	33,0	Strontium	0,03	Etain	(10^{-3})
Aluminium	7,1	Zirconium	0,03	Cobalt	$8 \cdot 10^{-4}$
Fer	3,7	Fluor	0,02	Thorium	$6 \cdot 10^{-4}$
Carbone	2,0	Chrome	0,02	Arsenic	$5 \cdot 10^{-4}$
Calcium	1,3	Chlore	0,01	Iode	$5 \cdot 10^{-4}$
Potassium	1,3	Vanadium	0,01	Cæsium	$5 \cdot 10^{-4}$
Sodium	0,6	Rubidium	$6 \cdot 10^{-3}$	Molybdène	$3 \cdot 10^{-4}$
Magnésium	0,6	Zinc	$5 \cdot 10^{-3}$	Uranium	$1 \cdot 10^{-4}$
Hydrogène	(0,50)	Cérium	$5 \cdot 10^{-3}$	Béryllium	(10^{-4})
Titane	0,46	Nickel	$4 \cdot 10^{-3}$	Germanium	(10^{-4})
Azote	0,10	Lithium	$3 \cdot 10^{-3}$	Cadmium	$5 \cdot 10^{-5}$
Phosphore	0,08	Cuivre	$2 \cdot 10^{-3}$	Sélénium	$1 \cdot 10^{-6}$
Soufre	0,08	Bore	$1 \cdot 10^{-3}$	Mercure	(10^{-6})
Manganèse	0,08	Plomb	$1 \cdot 10^{-3}$	Radium	$8 \cdot 10^{-11}$

minérale qu'organique, les autres des éléments mentionnés dans le tableau, dans la partie minérale du sol.

La *partie minérale* constitue de 90 à 99 % du poids des sols (c'est seulement dans les sols organogènes que son taux s'abaisse jusqu'à 10 % et moins), sa composition chimique est complexe. Elle représente des minéraux cristallins, silicates et alumosilicates, des hydroxydes amorphes et cristallisés d'alumini um, de fer et de silicium, ainsi que différents sels minéraux.

C'est le quartz (SiO_2, bioxyde de silicium) qui est le minéral le plus répandu dans le sol. Dans toutes les terres, son taux dépasse 60 %, dans les sols sableux légers il atteint 90 % et plus. Le quartz est d'une grande solidité mécanique et résiste à l'érosion chimique.

Parmi les alumosilicates primaires, les feldspaths potassiques, sodico-potassiques sont largement répandus dans le sol, les micas potassiques, ferreux-magnésiques le sont moins. En se dégradant, ces minéraux fournissent du potassium, du calcium, du magnésium, du fer pour les plantes.

Les minéraux primaires, quartz, spaths et micas sont ordinairement présents dans le sol sous forme de particules de sable et de poussière.

Les minéraux secondaires, argileux, qui se forment par modification des minéraux primaires, feldspaths et micas au cours de l'érosion

et de la formation du sol appartiennent par leur nature chimique aux hydro-alumo et ferrosilicates. Ils se trouvent dans le sol principalement sous forme de particules limoneuses ou colloïdales finement dispersées et leur surface globale est très vaste. D'après la structure de leur réseau cristallin, leur degré de dispersion et autres propriétés, les minéraux argileux se réunissent en trois groupes: kaolinite, montmorillonite et hydromicas.

La phase solide du sol contient en général relativement peu de sels d'acide phosphorique difficilement solubles (phosphates de calcium, de magnésium, de fer et d'aluminium) et certains sols renferment une quantité importante de carbonates peu solubles de calcium, de magnésium et du sulfate de calcium.

Dans le sol, les composés difficilement solubles se transforment constamment en composés facilement solubles et, par conséquent, plus accessibles aux plantes. Les processus inverses ont également lieu. Le sens de ces transformations dépend de nombreux facteurs: des régimes thermique et hydrique, de l'activité des micro-organismes, du travail de la terre, de l'apport d'engrais organiques et minéraux, etc. Quand la solution du sol s'enrichit du dioxyde de carbone dégagé par la respiration des racines et la décomposition de la matière organique, l'action dissolvante de la solution sur les composés minéraux difficilement solubles du sol se renforce et les rend assimilables pour les plantes.

Les divers agrégats du sol n'ont pas une même composition minéralogique et se distinguent par le taux d'éléments nutritifs qu'ils renferment. Les particules plus grosses du sol, celles de sable et de poussière, se composent essentiellement de quartz, et se distinguent par un taux élevé de silicium et par un taux plus bas d'aluminium, de fer, de calcium, de magnésim, de potassium, de phosphore et d'autres éléments.

Les fractions colloïdale et argileuse finement dispersées se distinguent principalement par une teneur élevée en aluminium et en fer, ainsi qu'en calcium, magnésium, potassium, sodium, phosphore, etc.

Les sols plus lourds, argiles et limons, sont plus riches en éléments nutritifs que les sols sableux et les limons sableux. Les particules minérales finement dispersées du sol (minéraux argileux) déterminent, avec la matière organique, les processus d'absorption dans le sol, son pouvoir d'absorption qui joue un rôle important dans les interactions des engrais avec le sol.

La *matière organique du sol* constitue une petite partie de la phase solide, mais a une grande importance pour la fertilité du sol et l'alimentation des plantes. Le taux de matière organique dans les sols varie entre 1-2 % (podzols et terres grises) jusqu'à 10 % dans les chernozems profonds.

A 85-90 %, la matière organique du sol est représentée par l'humus et seule une petite quantité par les débris non humifiés d'origine végétale, microbienne et animale.

Les différents types de sols se distinguent non seulement par leur teneur totale en humus, mais aussi par la composition et les propriétés de celui-ci. Dans l'humus des podzols engazonnés, le rapport acides humiques/acides fulviques est de 0,4-0,6; dans l'humus des chernozems, il est de 1-1,5 et plus. En outre, les acides humiques des chernozems sont moins finement dispersés et leur structure est plus complexe. Dans une grande mesure, cela explique qu'en comparaison des chernozems, la matière organique des podzols engazonnés est plus mobile et capable de subir une décomposition microbienne.

La réserve totale d'humus dans la couche arable des sols qui en contiennent relativement peu, terres grises et podzols engazonnés, est par hectare, de 20 à 50 tonnes; dans les chernozems, de 150 à 200 tonnes; dans un horizon d'un mètre, respectivement 50 à 120 et 300 à 800 tonnes (tableau 16).

Tableau 16

Teneur en humus des principaux types de sols

Sol	Teneur en humus dans la couche arable (%)	Réserves d'humus (en tonnes par hectare) dans une couche de terrain	
		de 0-20 cm (moyenne)	0-100 cm ou 0-120 cm
Podzol engazonné	0,5-3	53	80-120
Gris forestier podzolique	4-6	109	150-300
Chernozem:			
lessivé	7-8	192	500-600
typique	10-12	224	650-800
ordinaire	6-8	137	400-500
méridional	4-5	—	300-350
Brun	3-4	99	200-250
Châtain et châtain clair	1,5-3	—	100-200
Gris	1-2	37	50
Rouge	5-7	153	150-300

La matière organique renferme les principales réserves d'azote, les sols riches en matière organique ont donc davantage d'azote. La matière organique contient également du soufre et du phosphore. Quand elle se minéralise, l'azote, le phosphore et le soufre prennent une forme minérale, assimilable pour les végétaux. Les acides humiques et fulviques du sol, ainsi que l'acide carbonique formé au cours de la décomposition des substances organiques, dissolvent les composés minéraux peu solubles de phosphore, de calcium, de potassium, de magnésium et les rendent ainsi accessibles aux plantes.

Outre les particules minérales finement dispersées du sol, les substances humiques sont des agents des processus d'adsorption, déterminent le pouvoir absorbant du sol et son pouvoir tampon.

La matière organique est une source d'alimentation et d'énergie pour la plupart des micro-organismes du sol. Les substances humiques du sol se minéralisent plus difficilement que les composés organiques des débris végétaux et des substances non humifiées. Dans les champs cultivés pendant de longues années sans apport d'engrais, la quantité totale d'humus et d'azote du sol diminue considérablement. La minéralisation annuelle de la matière organique dans la couche arable des podzols engazonnés est de 0,6-0,7 tonne à l'hectare et de 1,0 tonne pour les chernozems avec formation de la quantité correspondante d'azote minéral accessible aux plantes. Lorsque la teneur moyenne de l'humus en azote est de 5 %, pour chaque portion d'azote absorbée par les plantes dans le sol doit se minéraliser vingt fois plus d'humus.

L'humus se minéralise avec le plus d'intensité sur les jachères où peuvent s'accumuler de 100 à 120 kg d'azote de nitrates par hectare. Parallèlement avec la minéralisation de la matière organique dans le sol se poursuit la genèse de l'humus et les variations de sa quantité totale sont déterminées par le rapport entre ces deux processus.

L'usage systématique d'engrais organiques et minéraux assure non seulement une augmentation des rendements des cultures, mais aussi la conservation et l'accumulation des réserves d'humus et d'azote dans le sol. Une grande quantité de débris de racines et de chaumes dans la terre renforce les processus d'humification.

Teneur des sols en éléments nutritifs essentiels et leur assimilabilité. Les différents types de sols se distinguent par leur teneur en éléments nutritifs essentiels (tableau 17).

Tableau 17

Teneur globale des différents sols en azote, phosphore et potassium dans la couche arable

Sols	N		P_2O_5		K_2O	
	%	tonnes par hectare	%	tonnes par hectare	%	tonnes par hectare
Podzols engazonnés:						
sableux	0,02-0,05	0,6-1,5	0,03-0,06	0,9-1,8	0,5-0,7	15-21
Limons argileux	0,05-0,13	1,5-4,0	0,04-0,12	1,2-3,6	1,5-2,5	45-75
Chernozems	0,2-0,5	6-15	0,1-0,3	3-9	2-2,5	60-75
gris	0,05-0,15	1,5-4,5	0,08-0,2	1,6-6	2,5-3	75-90

Dans la plupart des sols, les réserves totales d'azote, de phosphore et de potassium sont importantes et dépassent des dizaines et des centaines de fois leur exportation par la récolte d'une culture. Mais le gros des substances nutritives se trouve dans le sol sous forme de composés non accessibles aux plantes pour leur alimentation.

La réserve globale de substances nutritives du sol ne caractérise que sa fertilité potentielle. La fertilité effective du sol, sa capacité réelle d'assurer un rendement élevé des cultures agricoles, dépendent en premier lieu de sa teneur en substances nutritives assimilables.

Ne sont accessibles aux plantes pour leur alimentation que les substances nutritives se trouvant dans le sol sous forme de composés solubles dans l'eau et les acides faibles, ainsi qu'absorbées à l'état d'ions échangeables. La mobilisation des substances nutritives, le passage des composés peu solubles à des formes assimilables se produisent continuellement dans le sol sous l'influence de facteurs biologiques, physico-chimiques et chimiques.

Dans des sols différents, la mobilisation ne se fait pas avec la même intensité, elle dépend du caractère des composés qui représentent les substances nutritives, des conditions climatiques, du niveau de l'agrotechnique, etc.

Ordinairement, ce processus est lent et la quantité d'éléments nutritifs qui sont passés, au cours d'une végétation, sous une forme accessible ne suffit pas pour satisfaire entièrement les besoins des plantes. C'est pourquoi l'apport d'éléments nutritifs manquants sous forme d'engrais améliore fortement le rendement des cultures.

Pour une analyse agrochimique, la teneur en formes mobiles de substances nutritives dans le sol est déterminée dans différents extraits (aqueux, salins, alcalins et acides faibles). Mais il est pratiquement impossible de choisir un réactif dont le pouvoir dissolvant corresponde entièrement aux possibilités des plantes cultivées d'assimiler les éléments nutritifs du sol. Donc, pour évaluer le degré de fertilité réel de sols d'un type presque identique on se sert d'une méthode dont les données correspondent bien à la sensibilité réelle des plantes cultivées envers l'apport des espèces correspondantes d'engrais chimiques dans les expériences en champ sur ces sols.

Les valeurs limites de la teneur en formes mobiles (passant dans le solvant utilisé dans cette méthode) des substances nutritives dans le sol pour lesquelles on observe au champ des différences — très élevée, élevée, moyenne et faible — d'efficacité des engrais sont établies pour les différents groupes de cultures avec une exigence proche du niveau de la nutrition minérale.

La teneur en formes assimilables de substances nutritives dépend du type et des propriétés du sol, de son degré de cultivation et des apports antérieurs d'engrais. Elle peut varier suivant les exploitations et suivant les champs d'une même exploitation. C'est pourquoi, pour un usage correct des engrais, il faut, outre des expériences au champ, effectuer des analyses agrochimiques des sols afin d'apprécier leur richesse en azote, phosphore, potassium et autres éléments nutritifs mobiles.

Suivant les types de sols et d'autres conditions on utilise, en U.R.S.S., différentes méthodes d'analyse pour déterminer leur teneur en formes mobiles de substances nutritives. Ainsi, pour déter-

miner la quantité d'azote assimilable ou la teneur du sol en ses formes mobiles, prévoir l'efficacité des engrais azotés et établir les doses optimales d'azote, on utilise les méthodes suivantes: 1) dosage des nitrates ou de la somme de l'azote minéral (azote des nitrates et ammoniacal) dans une couche de terre de 0-20 ou 0-40 cm avant les semis; 2) dosage de l'azote mobile (somme de l'azote des nitrates, ammoniacal et amidique) dans une solution à 1 % de K_2SO_4 selon König; 3) dosage de l'azote facilement hydrolysable en solution acide (0,5 n H_2SO_4) selon Tiourine et Kononova; 4) dosage de l'azote hydrolysable en solution alcaline (1 n NaOH) selon Cornfield; 5) dosage de l'azote organique oxydable (30 % NaOH-5 % $KMnO_4$) selon Kriedji et Merkeley; 6) détermination du pouvoir nitrifiant des sols selon Kravkov (mise en compost du sol pendant 7 jours à température de 26-28° avec dosage de l'azote des nitrates du sol avant et après la mise en compost). Les recherches ont montré que pour établir les réserves de l'azote du sol assimilable et apprécier les besoins d'engrais azotés les meilleures méthodes sont: 1) et parfois 3) pour les podzols engazonnés; 1) et 2) pour les chernozems.

Groupement des sols d'après les indices agrochimiques

Classe de sols	P_2O_5				K_2O	
	D'après Kirsanov 0,2 n HCl 1:5	Tchirikov 0,5n CH_3COOH 1:25	Matchiguine 1% K_2CO_3 1:20	Arrhénius 1% d'acide citrique 1:10	Maslova 1n CH_3COONH_4 1:10	Kirsanov 0,2n HCl 1:5
I	2,5	2	1	8	5	4
II	2,5-5	2-5	1-1,5	8-15	5-10	4-8
III	5-10	5-10	1,5-3	15-30	10-15	8-12
IV	10-15	10-15	3-4,5	30-45	15-20	12-17
V	15-25	15-20	4,5-6	45-60	20-30	17-25
VI	25	20	6	60	30	25

Pour le dosage du phosphore et du potassium mobiles dans les principaux types de sols de l'U.R.S.S., on utilise différentes méthodes qui se distinguent surtout par le réactif employé pour extraire P et K, ainsi que par la proportion choisie et la durée de l'interaction avec le sol.

Dans les podzols engazonnés, le phosphore mobile est dosé par la méthode de Kirsanov (solvant 0,2 n HCl) et de Tchirikov (0,5 n CH_3COOH); dans les chernozems, par la méthode de Tchirikov et Truogg (0,02 n H_2SO_4); dans les terres grises et autres sols calcaires, par la méthode de Matchiguine (1 % de K_2CO_3); dans les terres rouges par la méthode d'Arrhénius (1 % d'acide citrique) et d'Oniani (0,1 n H_2SO_4). Pour doser les P et K mobiles, on utilise

largement dans les républiques baltes la méthode d'Egner-Rim (lactate de calcium à pH 3,6-3,7).

Pour doser le potassium échangeable dans les podzols engazonnés on recourt à la méthode de Kirsanov (0,2 n HCl), ainsi que de Maslova (1 n CH_3COONH_4) et de Peïvé (1 n NaCl), dans les chernozems non calcaires, les méthodes de Tchirikov (0,5 n CH_3COOH) et de Brovkina (0,2 n HCl); dans les terres grises et les chernozems calcaires, la méthode de Protassov [0,2 n $(NH_4)_2CO_3$] et de Matchiguine [1 % de $(NH_4)_2CO_3$]; dans les terres rouges, la méthode d'Oniani (0,1 n H_2SO_4).

Les analyses agrochimiques des sols pour le dosage des formes mobiles de substances nutritives sont effectuées par les laboratoires de zones. Les résultats de ces analyses sont présentés sous forme de cartes agrochimiques. Pour les dresser, tous les sols sont groupés, d'après leur acidité et leur richesse en formes mobiles d'azote, de phosphore et de potassium, en 6 classes (tableau 18): très basse (I), basse (II), moyenne (III), élevée (IV), haute (V), très haute (VI).

Tableau 18

(richesse en formes mobiles des éléments nutritifs en mg pour 100 g de sol)

		N				
		N facilement hydrolysable, d'après Tiourine et Kononova (0,5n H_2SO_4)				
Tchirikov 0,5n CH_3COOH 1:2,5	Matchiguine 1% de $(NH_4)_2CO_3$ 1:20	pH < 5,0	pH 5-6	pH > 6,0	Pouvoir nitrifiant	pH
2	10	4	3	3	0,5	4,5
2-4	10-20	5	4	4	0,8	4,5
5-8	20-30	5-7	4-6	4-5	0,8-1,5	4,6-5,0
9-12	30-40	7-10	6-8	5-7	1,5-3	5,1-5,5
13-18	40-60	10-14	8-12	7-10	3-6	5,6-6,0
19	60	14	12	10	6	6,0

Sur les cartes de la richesse en formes mobiles de phosphore et de potassium sont représentées en couleurs différentes les surfaces d'une richesse différente en ces éléments en accord avec les gradations existantes. Les cartes agrochimiques facilitent considérablement la tâche des agronomes quant à l'utilisation correcte des engrais.

Les données sur la teneur en formes mobiles de substances nutritives permettent de juger de la richesse du sol et des besoins d'engrais, ainsi que d'établir correctement les normes de fumure recommandées sous les cultures. On estime que, pour les céréales, une richesse moyenne du sol en éléments nutritifs correspond à la IIIe classe, pour les cultures sarclées et potagères plus exigeantes, respectivement à la IVe et V^e classes. Quand la richesse du sol en élé-

ments nutritifs dépasse la moyenne, la norme d'engrais recommandée est réduite; quand elle est inférieure à la moyenne, la norme augmente.

LE POUVOIR ABSORBANT DU SOL

Le pouvoir absorbant du sol joue un rôle important dans l'alimentation des plantes et dans la transformation des engrais apportés. C'est la faculté qu'a le sol d'absorber certaines substances de la solution qui le traverse et de les retenir.

Le **pouvoir absorbant biologique** est lié à l'activité vitale des plantes et des micro-organismes du sol qui puisent sélectivement dans le sol les éléments dont ils ont besoin pour leur alimentation minérale, les empêchant ainsi de se lessiver. Après leur mort, les racines, les débris végétaux et les corps microbiens se décomposent et s'humifient progressivement. La minéralisation et l'utilisation par les plantes de l'azote, du phosphore et du soufre précédemment fixés dans le sol sous une forme organique se font assez lentement. L'azote et les éléments minéraux se libèrent plus rapidement du plasma des micro-organismes après leur mort.

L'intensité de l'absorption biologique dépend de l'aération, de l'humidité et d'autres propriétés du sol, de la quantité et de la composition de la matière organique qui est la source de nourriture et d'énergie pour les micro-organismes hétérotrophes, prédominants dans le sol. L'apport au sol d'une importante quantité de matière organique pauvre en azote (paille ou fumier de paille) provoque une prolifération rapide des microbes et s'accompagne d'une fixation biologique intense de l'azote minéral, ce qui nuit à l'alimentation azotée des plantes.

L'absorption biologique est un moyen de fixation de l'azote des nitrates qui n'est retenu dans le sol par aucun autre moyen. Les nitrates non assimilés par les plantes et les micro-organismes sont lessivés. Le danger de telles pertes est particulièrement grand sur les sols légers dans les zones suffisamment humides et d'agriculture irriguée. Sous l'influence des bactéries dénitrifiantes, l'azote des nitrates quitte le sol à l'état d'azote moléculaire ou de ses oxydes gazeux.

Le **pouvoir absorbant mécanique** est dû à la propriété qu'a le sol, comme tout corps poreux, de retenir des particules même tenues des suspensions filtrantes. L'absorption mécanique explique la rétention et le caractère de la répartition dans le sol des engrais insolubles apportés (farine de phosphorites, chaux) et de la vase déposée par l'eau des crues sur les terres inondées. Grâce au pouvoir absorbant mécanique, le sol retient aussi sa fraction colloïdale qui est la plus précieuse.

Le **pouvoir absorbant physique** est l'adsorption positive ou négative par les particules du sol de molécules entières de substances dissoutes. On ne connaît aucun cas d'adsorption physique molécu-

laire positive par le sol des sels minéraux dissous. L'adsorption moléculaire négative s'observe dans l'interaction du sol avec les solutions de chlorures et de nitrates déterminant leur grande mobilité dans le sol.

Le **pouvoir absorbant chimique** est en rapport avec la formation de composés insolubles ou peu solubles dans l'eau par réactions chimiques entre différents sels dissous (ions de la solution du sol).

Ainsi, les anions des acides carbonique et sulfurique forment, avec les cations bivalents du calcium et du magnésium, $CaSO_4$, $CaCO_3$, $MgCO_3$ peu solubles dans l'eau et passant dans un précipité. C'est dans la transformation du phosphore dans le sol que l'absorption chimique joue un rôle particulier. Un apport de superphosphates renfermant du phosphore sous la forme de sel hydrosoluble $Ca(H_2PO_4)_2$, phosphate de calcium monosubstitué, provoque dans les sols une intense fixation chimique du phosphore. Dans les terres acides (podzols et sols rouges) renfermant beaucoup de sesquioxydes, la fixation chimique du phosphore s'accompagne de la formation de phosphates de fer et d'aluminium peu solubles, $AlPO_4$ et $FePO_4$. Dans les sols alcalins renfermant du bicarbonate de calcium dans leur solution (chernozems, sols gris), la fixation chimique du phosphore résulte de la formation de phosphates bi et trisubstitués peu solubles de calcium $CaHPO_4$ et $Ca_3(PO_4)_2$.

L'absorption (fixation) chimique du phosphore est cause de sa faible mobilité dans le sol et elle abaisse l'accessibilité de cet élément aux plantes à partir des formes d'engrais solubles apportées au sol. D'après leur aptitude à fixer le phosphore, les sols se répartissent de la façon suivante: terres rouges > podzols engazonnés > terres grises > chernozems.

Le **pouvoir absorbant physico-chimique ou d'échange** est d'une importance exceptionnelle pour l'interaction des engrais avec le sol. L'absorption physico-chimique est la faculté qu'ont les particules colloïdales finement dispersées (de 0,2 à 0,001 μm) du sol d'absorber différents cations de la solution. L'absorption de certains cations s'accompagne du passage dans la solution d'un nombre équivalent d'autres cations, fixés jusque-là dans la phase solide du sol.

Tout l'ensemble des particules colloïdales organiques et minérales du sol (représentées par des substances humiques, des minéraux argileux, des hydroxydes de fer et d'aluminium) participant à l'absorption d'ions par échange a été appelé par K. Gedroïtz *complexe absorbant du sol* ou CAS.

C'est la charge négative des particules colloïdales organiques et minérales qui conditionne leur aptitude à fixer les cations échangeables. Il y a dans le sol des colloïdes à charge négative ou positive, mais, généralement, dans la plupart des sols, ce sont les particules chargées négativement qui prédominent. A l'état naturel, les sols renferment toujours un certain nombre de cations absorbés. Ceux-ci peuvent être Ca^{2+}, Mg^{2+}, H^+, Al^{3+}, Na^+, K^+, NH_4^+, etc. Ces cations sont échangeables avec d'autres se trouvant dans la solution.

L'échange de cations entre la solution et le complexe absorbant du sol se fait en quantités strictement équivalentes.

La réaction d'échange des cations est très rapide. Un apport au sol d'engrais facilement solubles (KCl, NH_4Cl, NH_4NO_3, etc.) les fait interagir immédiatement avec le sol en échange des cations se trouvant jusque-là à l'état absorbé.

La réaction d'échange des cations est réversible étant donné que le cation absorbé par le sol peut passer de nouveau dans la solution:

$$(CAS)Ca + 2KCl \rightleftharpoons (CAS)^{K}_{K} + CaCl_2;$$

$$(CAS)Ca + 2NH_4Cl \rightleftharpoons (CAS)^{NH_4}_{NH_4} + CaCl_2.$$

Suivant la concentration de la solution, son volume et la nature des cations échangés il s'établit, entre les cations de la solution et les cations de CAS un certain équilibre dynamique. Lorsque change la composition de la solution du sol, cet équilibre se trouve perturbé, si bien que certains cations passent de la solution à l'état absorbé, tandis que d'autres passent de l'état absorbé dans la solution. Un apport d'engrais chimique tels que KCl fait augmenter la concentration de la solution du sol, les cations de l'engrais entrent en réaction d'échange avec les cations du CAS et sont absorbés par le sol.

L'assimilation d'un cation quelconque par les plantes fait baisser sa concentration dans la solution, ce qui provoque le passage de ce cation de l'état absorbé dans la solution en échange d'autres cations de la solution. Plus le complexe absorbant est saturé de ce cation, plus vite et plus facilement il passe dans la solution. Le nombre de cations passant de l'état absorbé dans la solution augmente avec la concentration de la solution et si la concentration reste la même, avec la concentration du volume de la solution du sel refoulé.

L'absorbabilité des différents cations n'est pas la même. Plus grandes sont la charge du cation (la valence) et sa masse atomique, plus fortement il est absorbé et plus difficilement il est déplacé de l'état absorbé par les autres cations. Les ions H^+ font exception à cette règle, leur masse atomique est la plus petite, mais ils possèdent une grande énergie d'absorption et la faculté de repousser les autres cations du CAS.

La capacité d'échange et la composition des cations absorbés dans les différents sols. De sols différents renferment une quantité non identique de cations absorbés échangeables (tableau 19). La teneur totale du sol en cations absorbés échangeables est appelée *capacité d'échange*. Elle s'exprime en milli-équivalents-grammes pour 100 g de sol. Par exemple, si 100 g de terre renferment à l'état absorbé 200 mg Ca^{2+}, 24 mg Mg, 9 mg NH_4^+, la capacité d'échange de cette terre sera: $\frac{200}{20} + \frac{24}{12} + \frac{9}{18} = 12{,}5$ mEq pour 100 g(20:masse équivalente du calcium; 12, du magnésium; 18, de l'ammonium).

La valeur de la capacité d'échange caractérise le pouvoir absorbant des sols. Elle dépend de la composition mécanique et minéralogique du sol et de sa teneur totale en matière organique. Les sols pauvres en fraction colloïdale (sables et limons sableux) ont une faible capacité d'échange. Plus il y a, dans la terre, de particules colloïdales minérales et organiques, plus sa capacité d'échange est élevée. Dans l'argile et les limons argileux, la capacité d'échange est plus élevée que dans les sables et les limons sableux. Les chernozems riches en humus ont une capacité d'échange beaucoup plus élevée (40 à 60 mEq pour 100 g) que les podzols et les terres grises (10-15 mEq pour 100 g).

La capacité d'échange peu élevée des podzols engazonnés est due à une teneur en humus plus basse avec prédominance, dans la fraction colloïdale minérale, de minéraux argileux du type kaolinite dont la capacité de saturation est basse (5-15 mEq pour 100 g de minéral). Non seulement les chernozems sont plus riches en humus, mais encore la fraction minérale finement dispersée de ces sols renferme davantage de minéraux du groupe des montmorillonites dont la capacité d'échange est élevée (80 à 100 mEq pour 100 g de minéral).

La capacité d'échange du sol exerce beaucoup d'influence sur la transformation des engrais minéraux apportés au sol et détermine leur mobilité. Sur les terres dont la capacité d'échange est faible (sables et limons sableux) l'apport d'engrais facilement solubles peut être cause du lessivage des substances nutritives et d'une augmentation excessive de la concentration de la solution, c'est pourquoi il vaut mieux apporter à ces sols les engrais azotés et potassiques en petites doses, peu avant les semis. Sur les sols à capacité d'échange élevée on n'observe ni le lessivage des substances nutritives, ni l'élévation de la concentration de la solution.

Les différents sols se distinguent non seulement par leur capacité d'échange totale, mais aussi par la *composition des cations absorbés*. Dans la plupart des sols, ce sont les cations Ca^{2+} qui prédominent parmi les cations absorbés, la seconde place revient à Mg^{2+} et l'on trouve en quantité beaucoup moindre K^+ et NH_4^+. La somme Ca^{2+} + + Mg^{2+} constitue ordinairement les 90 % de la quantité totale de cations absorbés échangeables. Dans les sols acides (podzols et terres rouges) H^+ et Al^{3+} occupent une place importante parmi les cations absorbés; dans les sols sodiques, Na^+ (tableau 19).

La composition des cations absorbés exerce une grande influence sur les propriétés du sol et sur la croissance des plantes. Le calcium provoque la coagulation des colloïdes organiques et minéraux. C'est pourquoi la prédominance dans la composition de cations Ca^{2+} absorbés, par exemple, dans les chernozems, favorise le maintien d'une structure stable et assure de bonnes propriétés physiques du sol. Quand le sol est saturé de sodium (terres sodiques) les colloïdes sont peptisés, ce qui entraîne leur lessivage, la destruction des agrégats structuraux et la détérioration des propriétés physiques du sol

(solidité, viscosité, etc.). En outre, en présence de sodium dans le complexe absorbant du sol, le sodium passe dans la solution en

Tableau 19

Capacité d'échange des différents sols et teneur en humus

Sol	Teneur (en %)			Capacité d'échange des cations (mEq pour 100 g de sol)	Teneur en cations absorbés (mEq pour 100 g de sol)		
	d'humus	de particules minérales de diamètre inférieur à 0,00025 mm	de particules minérales de diamètre de 0,00025 à 0,001 mm		Ca + Mg	Na	H
Podzol engazonné	2,5	2	—	15	8	—	7
Gris forestier	3	5	4	20	16	—	4
Chernozem :							
lessivé	8	15	5	50	40	—	10
typique	10	5	10	65	60	—	5
ordinaire	6	5	10	35	31	2	2
méridional	4,5	5	10	30	28	2	—
Châtain	2,5	3	5	27	25	2	—
Terre grise	1	3	5	15	14	1	—

échange d'autres cations avec formation de bicarbonate de sodium, la réaction de la solution devient alcaline et nuit au développement des plantes :

$$(CAS)^{Na}_{Na} + Ca(HCO_3)_2 \rightleftharpoons (CAS)Ca + 2NaHCO_3.$$

Lorsque la teneur en ions hydrogène et aluminium dans le complexe absorbant du sol est élevée, ils peuvent, en interagissant avec d'autres cations, passer dans la solution et la rendre acide :

$$(CAS)^{H}_{Al} + 4KCl \rightleftharpoons (CAS)^{K}_{K}{}^{K}_{K} + HCl + AlCl_3.$$

Une solution trop acide et surtout trop riche en aluminium a une action nocive sur les plantes.

ACIDITÉ ET POUVOIR TAMPON DU SOL

L'*acidité du sol* est due à la présence d'ions H^+ dans la solution du sol et dans le complexe absorbant. On distingue l'acidité effective et l'acidité potentielle du sol. L'*acidité effective* est due aux ions H^+ de la solution du sol. Elle est déterminée dans un extrait aqueux du sol et est mesurée par le pH qui est le logarithme négatif de la concentration des ions H^+ dans la solution.

Suivant la valeur du pH, la réaction de la solution du sol est définie comme suit : pH 7,1-8 et plus — alcaline ; 7 — neutre ; 6-6,5 — presque neutre ; 5-5,5 — faiblement acide ; 4,5-5 — d'une acidité moyenne ; 4,5-4 et moins, fortement acide. Une réaction alcaline ou fortement acide de la solution a une action néfaste sur le développement des plantes et des micro-organismes du sol.

L'acidité effective est étroitement liée à l'acidité *potentielle* (inapparente) que l'on subdivise en acidité *d'échange* et acidité *hydrolytique*. En interagissant avec des solutions de sols, les ions H^+ et Al^{3+} qui se trouvent dans le complexe absorbant du sol sont repoussés de leur état absorbé et acidifient la solution du sol. Il s'y forme alors de l'acide chlorhydrique et du chlorure d'ammonium, sel hydrolytiquement acide :

$$(CAS)^{H}_{Al} + 4KCl \rightleftharpoons (CAS)^{K}_{K}{}^{K}_{K} + HCl + AlCl_3;$$

$$AlCl_3 + 3H_2O = 3HCl + Al(OH)_3$$

L'acidité due aux ions H^+ et Al^{3+} se trouvant à l'état absorbé et capables de passer dans la solution sous l'action sur le sol d'un sel neutre quelconque porte le nom d'*acidité d'échange*. Elle est déterminée en traitant le sol par une solution de KCl à 1 n (extrait salin) et s'exprime en mEq pour 100 g ou par la valeur de pH. Dans cette solution de chlorure de potassium on détermine l'acidité effective et d'échange, aussi le pH de cette solution est-il ordinairement plus bas que le pH de l'extrait aqueux.

Une acidité d'échange caractérise les podzols engazonnés et les terres rouges, ainsi que les chernozems podzolisés et lessivés. C'est une acidité inapparente, mais quand on fait agir des sels neutres sur le sol, elle devient effective et exerce une action néfaste sur le développement des plantes. L'aluminium passant dans la solution est particulièrement nocif.

Quand on traite le sol par une solution de KCl à 1 n, tout l'hydrogène ne passe pas du complexe absorbant du sol dans la solution, une partie de ses ions, plus solidement fixée par les colloïdes du sol et les sels neutres, n'est pas repoussée. On ne peut le faire qu'en agissant sur le sol par une solution de sel hydrolytiquement alcaline, par exemple, l'acétate de sodium, 1 n CH_3COONa.

L'acidité du sol due à des ions d'hydrogène moins mobiles qui sont refoulés du CAS en traitant le sol par un sel hydrolytiquement alcalin est l'*acidité hydrolytique*. On la rencontre plus souvent que l'acidité d'échange, elle est propre à la plupart des sols, même aux chernozems. Cette acidité inclut la partie moins mobile des ions H^+ absorbés s'échangeant moins facilement contre les cations de la solution du sol. Il est nécessaire de la déterminer afin de résoudre certaines questions pratiques relatives à l'utilisation des engrais (éta-

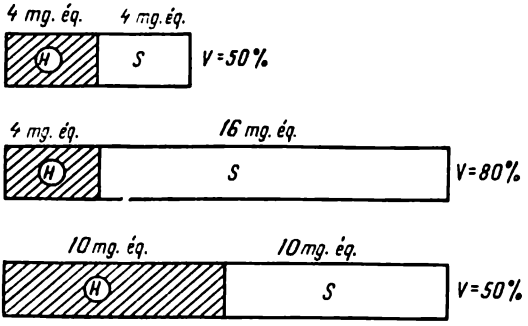


Fig. 4. Représentation schématique de la dépendance entre la capacité d'échange totale (T), l'acidité hydrolytique (H_h), la somme des bases échangeables (S) et le degré de saturation du sol par les bases

blir la dose de chaux et les possibilités d'employer efficacement la farine de phosphorites).

Quand on traite le sol par une solution d'acétate de sodium tous les ions H^+ et Al^{3+} contenus dans le sol passent dans la solution, c'est-à-dire qu'on détermine la somme de toutes les espèces d'acidité (effective, d'échange, hydrolytique). Pour déterminer la valeur de l'acidité proprement hydrolytique il faut soustraire de l'indice global la valeur de l'acidité d'échange. Ordinairement, on ne le fait pas et l'on désigne par « acidité hydrolytique » l'acidité totale du sol exprimée en mEq pour 100 g.

Pour caractériser le sol, il importe de connaître non seulement la quantité globale d'ions hydrogène absorbés, mais aussi le rapport entre eux et les autres cations absorbés, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+, etc. La quantité de tous les cations absorbés, excepté l'hydrogène et l'aluminium, en mEq pour 100 g de sol (somme des bases absorbées) est désignée par la lettre S et la quantité totale d'hydrogène absorbé, par le symbole H_h. Leur addition donne la capacité d'échange totale du sol (T) en mEq pour 100 g de sol : $S + H_h = T$. La somme des bases échangeables (S) exprimée en % de la capacité d'échange totale des sols (T) est le degré de saturation des sols par les bases et s'exprime par la lettre V :

$$V\% = \frac{S}{T} \cdot 100, \quad \text{ou} \quad V\% = \frac{S}{S+H_h} \cdot 100.$$

Le degré de saturation par les bases est un indice important caractérisant l'acidité du sol, on en tient compte pour déterminer dans quelle mesure le sol a-t-il besoin de chaux (fig. 4). Moins le degré de saturation est élevé (l'acidité absolue étant la même), plus le sol a besoin d'un chaulage.

La capacité d'échange et le degré de saturation des sols par les bases déterminent leur pouvoir tampon, c'est-à-dire la capacité qu'a le sol de résister aux changements de réaction de sa solution

vers l'acidité ou l'alcalinité quand on lui apporte des engrais physiologiquement acides ou physiologiquement alcalins. Plus la capacité d'échange du sol est élevée, plus son pouvoir tampon est grand. Les bases absorbées (calcium, magnésium, etc.) tamponnent le sol contre l'acidification ; l'hydrogène absorbé le fait contre l'alcalinisation de la solution du sol :

$$(CAS)Ca + 2HNO_3 \rightleftharpoons (CAS)\begin{matrix}H\\H\end{matrix} + Ca(NO_3)_2;$$

$$(CAS)\begin{matrix}H\\H\end{matrix} + Ca(OH)_2 \rightleftharpoons (CAS)Ca + 2H_2O.$$

Dans les sols saturés de bases, les acides libres (HNO_3, par exemple) sont neutralisés en raison de l'absorption des ions H^+ de l'acide par le sol en échange des cations Ca^{2+} qui, de l'état absorbé, passent dans la solution, dans laquelle, à la place de l'acide, se forme un sel neutre. Dans les sols ayant une acidité d'échange ou hydrolytique, la neutralisation de la base résulte de l'absorption de son cation en échange d'ions H^+ qui passent dans la solution et fixent les ions OH^- avec formation d'eau.

Plus l'acidité hydrolytique du sol est élevée et plus est grand son pouvoir tampon contre l'alcalinisation. Les sols ayant un degré élevé de saturation par les bases (chernozems, terres grises) sont fortement tamponnés contre l'acidification.

L'intensité de l'action tampon du sol dépend de la capacité d'échange : plus elle est grande, plus son pouvoir tampon est fort. Les terres riches en humus, les terres plus argileuses, les limons argileux ont un pouvoir tampon élevé. Les sols à basse capacité d'échange, sables et limons sableux, ont un faible pouvoir tampon, aussi bien contre l'acidification que contre l'alcalinisation, c'est pourquoi on évitera d'apporter à ces sols de grandes quantités d'engrais physiologiquement acides ou physiologiquement alcalins. L'apport de grandes quantités d'engrais organiques et le chaulage augmentent le pouvoir tampon du sol contre l'acidification.

CHAPITRE 3

L'AMENDEMENT CHIMIQUE DES SOLS

LE CHAULAGE DES SOLS ACIDES

Le chaulage est d'une grande importance : il permet d'intensifier la production agricole sur les sols acides, d'augmenter leur fertilité et l'efficacité des engrais minéraux. Ont une réaction acide les terres rouges, les podzols engazonnés, les sols gris forestiers, beaucoup de terrains marécageux et, en partie, les chernozems lessivés.

Le chaulage permet de réduire l'acidité excessive des sols, il crée une réaction du milieu favorable aux cultures agricoles et aux micro-organismes du sol, il augmente la fertilité des terres et l'efficacité des engrais.

A chaque espèce de plantes correspond un intervalle de réaction du milieu qui convient le mieux à leur croissance et à leur développement. La plupart des cultures agricoles poussent mieux et fournissent de meilleures récoltes quand la réaction du milieu est proche de la neutralité (pH 6,5-7,5). La luzerne, la betterave sucrière, le chanvre et le chou ne supportent pas du tout les sols acides, le pH optimal se trouve, pour eux, entre 7 et 7,5. L'orge, le blé, le maïs, toutes les légumineuses à l'exception des lupins, la plupart des légumes exigent une réaction neutre (ou proche de la neutralité). Le seigle, l'avoine, le mil, le sarrasin, la fléole, le radis, les tomates croissent dans un large intervalle de pH ; toutefois, ils viennent mieux dans un sol légèrement acide, mais proche de la neutralité. Le lin, la pomme de terre, le thé, le lupin donnent une meilleure croissance quand la réaction est faiblement acide et souffrent aussi bien d'une basicité supérieure à pH 6-6,5 que d'une plus forte acidification du sol. C'est surtout dans la première période de la croissance que les plantes sont sensibles à une forte acidité.

La réaction acide exerce une influence variée et complexe néfaste sur les cultures agricoles exigeantes envers la neutralité du milieu. Dans les sols, l'action néfaste directe d'une concentration élevée d'ions hydrogène s'allie à l'influence indirecte de divers facteurs et conditions accompagnant la réaction acide.

Les sols acides se distinguent par des propriétés biologiques, physiques et chimiques défavorables. Leur fraction colloïdale est pauvre en calcium et autres éléments basiques. Les ions hydrogène repoussent le calcium de l'humus du sol, le rendent plus dispersé, plus mobile et la saturation en hydrogène des particules minérales colloïdales détruit celles-ci peu à peu.

Ceci explique la faible teneur des sols acides en fraction colloïdale, raison pour laquelle leurs propriétés physiques sont mauvaises, leur capacité d'échange et leur pouvoir tampon sont bas.

Dans les sols acides, l'activité des bactéries nitrifiantes, fixatrices d'azote et d'autres micro-organismes utiles est ralentie. Les substances nutritives assimilables par les végétaux se forment en faible quantité.

Un autre effet néfaste d'une forte acidité est une plus grande mobilité de l'aluminium et du manganèse dans le sol. Quand la réaction est acide, les composés d'aluminium et de manganèse deviennent plus solubles et ils répriment la végétation. Dans ces conditions, l'alimentation phosphorée des plantes est défectueuse.

Dans les sols acides, le molybdène est moins mobile et il peut ne pas suffire à la croissance des plantes, surtout des légumineuses.

En réaction acide, l'assimilation du calcium et du magnésium, dont le rôle est important pour la vie des plantes, devient difficile.

Une acidité élevée de la solution du sol ralentit la croissance des racines, dont la perméabilité et le métabolisme se trouvent perturbés. C'est pourquoi, dans l'ensemble, les conditions de nutrition des plantes sont plus mauvaises. Dans de tels sols, l'efficacité des engrais est très diminuée.

Action de la chaux sur le sol et sur le rendement

La chaux apportée au sol réagit avec l'acide carbonique de la solution et le neutralise. De cette façon, le carbonate de calcium insoluble dans l'eau se transforme en bicarbonate soluble qui, hydrolytiquement, est un sel alcalin:

$$CaCO_3 + H_2O + CO_2 = Ca(HCO_3)_2;$$

$$Ca(HCO_3)_2 + 2H_2O = Ca(OH)_2 + 2H_2O + 2CO_2;$$

$$Ca(OH)_2 \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2OH^-.$$

La concentration des ions calcium s'élève dans la solution du sol; ils repoussent l'hydrogène du complexe absorbant du sol:

$$(CAS)\begin{matrix}Ca\\H\\H\end{matrix} + Ca^{2+} + 2HCO_3^- \rightleftharpoons (CAS)\begin{matrix}Ca\\Ca\end{matrix} + 2H_2CO_3;$$

$$(CAS)\begin{matrix}Ca\\H\\H\end{matrix} + Ca(OH)_2 \rightleftharpoons (CAS)\begin{matrix}Ca\\Ca\end{matrix} + 2H_2O.$$

La chaux neutralise également les acides organiques libres (humiques) que renferment les sols acides:

$$2RCOOH + Ca(OH)_2 \rightleftharpoons (RCOO)_2Ca + 2H_2O.$$

Ainsi, l'apport de chaux à la solution du sol neutralise l'acide carbonique et les acides organiques et, dans le complexe absorbant, les ions hydrogène. En éliminant l'acidité, le chaulage exerce une action positive variée sur les propriétés du sol, crée un milieu fa-

vorable au développement des plantes et aux micro-organismes utiles. La substitution du calcium à l'hydrogène absorbé s'accompagne de la floculation des colloïdes du sol, ils se détruisent moins, sont plus difficilement lessivés, les propriétés physiques du sol : structure, perméabilité à l'eau, aération s'améliorent. Après un chaulage, les composés mobiles d'aluminium et de manganèse du sol passent à des formes insolubles.

Le chaulage fait diminuer la mobilité des composés du bore dans le sol et rend plus mauvaises les conditions de la nutrition des plantes en bore, c'est pourquoi des apports d'engrais renfermant du bore sont efficaces sur les sols chaulés, surtout sous des cultures exigeantes en bore : betterave sucrière et fourragère, trèfle, luzerne, sarrasin, oignon.

En abaissant l'acidité du sol et en améliorant ses propriétés physiques, le chaulage stimule l'activité vitale des micro-organismes et la mobilisation, par ceux-ci, des substances nutritives. Dans les sols chaulés, la nitrification est plus intense, les bactéries fixatrices de l'azote (bactéries des nodosités et azotobacter) se développent mieux, la terre s'enrichit d'azote aux dépens de l'atmosphère, le sol contient davantage de formes accessibles de calcium, de magnésium, de potassium, de phosphore et de molybdène. L'alimentation des plantes en azote et en éléments minéraux s'améliore aussi du fait que, sur les sols chaulés, les plantes développent un système radiculaire plus puissant, capable d'assimiler davantage de substances nutritives.

Dans les conditions naturelles, la principale source de calcium et de magnésium pour la nutrition des plantes sont les ions absorbés échangeables. Il y a très peu dans le sol, de composés hydrosolubles de ces éléments. La majeure partie du calcium et du magnésium se trouve sous une forme inassimilable, dans la composition des minéraux et des sels insolubles.

Sur les terres grises, les chernozems et les sols forestiers lourds il y a suffisamment de calcium et de magnésium pour l'alimentation des cultures même les plus exigeantes.

Dans les terres grises, les chernozems et les lourds sols forestiers il y a peu de calcium absorbé échangeable et encore moins de magnésium. Une grande partie de ces éléments se trouve entraînée par les eaux. Quand le sol est acide, l'assimilation des cations calcium et magnésium est également réduite par suite de l'antagonisme avec les ions hydrogène. Les matériaux calcaires auraient, sur de tels sols, une grande importance comme sources de calcium et de magnésium pour l'alimentation des plantes.

Le **calcium** est utilisé par les plantes en grandes quantités. Cet élément est exporté avec les récoltes comme suit : (calculé en CaO) : par les céréales, 20 à 30 kg à l'hectare ; par les légumineuses à grains et les plantes textiles, 40 à 60 kg ; par la pomme de terre, la betterave sucrière, le maïs, le lupin, 60 à 120 kg ; par les légumineuses herbacées, le tournesol, le tabac, 120 à 250 kg ; par le chou, 500 kg.

Le calcium n'est pas réutilisé par les plantes et les signes de sa déficience se manifestent avant tout sur les jeunes feuilles. C'est dans les vieilles feuilles que le calcium se trouve emmagasiné, il y en a moins dans les graines que dans les feuilles et les tiges. Par exemple (calculé en CaO) les grains du pois renferment 0,1 % de calcium, alors que la paille en contient jusqu'à 2 %.

Les cultures agricoles consomment de 10 à 70 kg de magnésium (calculé en MgO) à l'hectare. Ce sont la pomme de terre, la betterave sucrière, le tabac, les légumineuses qui en exportent le plus. Le magnésium est réutilisé et les signes de sa déficience se manifestent avant tout sur les vieilles feuilles. La pénurie de magnésium se fait surtout sentir au niveau de la production marchande: grain, tubercules, racines.

Le chaulage augmente fortement le rendement des cultures agricoles. De nombreuses expériences ont prouvé que, sur les sols acides, ce procédé augmente le rendement du blé de printemps et de l'orge de 2 à 5 q, celui du blé de 3 à 7 q, du foin de légumineuses de 8 à 15 q et plus, de la betterave sucrière ou fourragère, du chou de 40 à 100 q, du maïs fourrager de 50 à 70 q à l'hectare.

Sur les sols chaulés, l'efficacité des engrais minéraux et organiques augmente considérablement (tableau 20). L'apport simultané de chaux et de fumier est d'un puissant effet.

Tableau 20

Influence du chaulage sur l'efficacité des engrais (moyenne de 10 ans)

Variantes des expériences	Nombre d'unités fourragères		Nombre d'unités fourragères (milliers par hectare)		Augmentation du gain par chaulage (milliers d'unités fourragères par hectare)	Croissance de l'efficacité de la fumure après chaulage, en %
	milliers par hectare	%	sans chaulage	après chaulage		
sans fumure	27,4	100	—	—	—	—
$N_{330}P_{240}K_{330}$	32,2	117	4,7	—	—	—
Idem + 10 t de chaux	40,7	148	—	13,3	8,6	64
Idem + 10 t de fumier	37,8	138	10,3	—	—	—
Idem + 10 t de fumier + + 10 t de chaux	44,2	161	—	16,8	6,5	38

Remarque : Les doses de chaux et de fumier sont données à l'hectare.

Les expériences montrent que, sur les sols acides podzoliques, l'apport de chaux et de 10 à 20 tonnes de fumier assure, dans la plupart des cas, un accroissement égal, et même supérieur, des rendements des cultures agricoles qu'une double dose de fumier (20 à 40 t/ha) sur un terrain non chaulé.

L'action bénéfique de l'amendement calcaire sur le rendement quand on donne la dose complète se fait sentir pendant 8 à 10 ans. Durant cette période, chaque tonne de chaux fournit un gain total de rendement de toutes les cultures égal, calculé en grain, à 12-15 q/ha.

La chaux se décompose lentement et interagit avec le sol, c'est pourquoi son action se fait sentir progressivement, l'effet du chaulage augmente chaque année et atteint un maximum au bout de 2-3 ans.

Les différentes cultures ne réagissent pas de manière égale au chaulage. Y sont particulièrement sensibles la betterave (sucrière, fourragère, potagère), le chanvre, le maïs, le tournesol, le blé, l'orge, le pois, la féverole, le trèfle, la luzerne, le chou, les concombres, l'oignon. Ces cultures supportent mal une forte acidité du sol.

L'avoine, le seigle, le sarrasin, les tomates supportent une acidité modérée, mais répondent bien au chaulage. La pomme de terre et le lin sont moins sensibles à l'acidité et réagissent pourtant bien à un apport d'amendement calcaire sur des sols moyennement et fortement acides. Cependant un apport de fortes doses de chaux avec des normes réduites de fumure peut détériorer la qualité de la production. Le lin est frappé par la bactériose, la pomme de terre souffre de la gale, la teneur en amidon des tubercules baisse. Dans les assolements où la pomme de terre et le lin tiennent une place importante, si l'on utilise de fortes doses d'engrais, surtout potassiques, il faut donner des doses complètes de chaux et il est alors préférable d'épandre des calcaires renfermant du magnésium et, en même temps, des engrais contenant du bore. Le lupin et la serradella viennent bien en sol acide et leur récolte baisse quand on chaule à fortes doses. Si ces plantes sont cultivées sur engrais vert, la chaux ne devra pas être donnée avant les semis, mais lors de l'enfouissage.

Les engrais calciques

Les engrais calciques sont obtenus par broyage ou calcination des roches calcaires solides (pierres calcaires, dolomies, craie), on les extrait aussi sous forme de roches calcaires friables.

La **farine calcaire** est l'engrais calcique le plus répandu; on l'obtient par broyage ou mouture de calcaires qui se composent surtout de carbonate de calcium $CaCO_3$, mais sont plus souvent dolomités et contiennent également $MgCO_3$ (calculé en MgO, jusqu'à 10 à 15%). Lorsque la teneur en $MgCO_3$ est plus élevée, la roche est appelée dolomie. Plus la roche renferme de $MgCO_3$, plus elle est dure.

La qualité des engrais calciques dépend de la quantité de composés neutralisant l'acidité du sol et de la finesse de la mouture. Les engrais calciques de l'industrie ne doivent pas contenir moins de 85 % de $CaCO_3$ et de $MgCO_3$. Plus la mouture des roches calcaires est fine et plus vite l'acidité du sol se trouve neutralisée. La forme calcaire livrée en U.R.S.S. doit avoir une humidité de 1,5 %, ne

pas renfermer plus de 5 % de particules de diamètre supérieur à 1 mm et avoir jusqu'à 70 % de particules de diamètre inférieur à 0,25 mm.

En 1975, la production des engrais calciques en U.R.S.S. se montait à environ 30 millions de tonnes.

Les roches calcaires friables n'exigeant pas de mouture permettent d'élargir la production d'engrais calciques. Ce sont les tufs calcaires, la marne, la chaux lacustre, les tufs tourbeux, la farine de dolomie naturelle. Les gisements de roches calcaires friables sont répandus dans beaucoup d'endroits.

Le **tuf calcaire** renferme de 90 à 98 % de $CaCO_3$, c'est un engrais calcique précieux. Avant de l'épandre, il est parfois nécessaire de le tamiser pour éliminer les particules plus grosses. Les tufs calcaires se rencontrent le plus souvent dans la nature sur les terres basses: plaines submersibles ou au jaillissement des sources.

La **marne** contient de 25 à 75 % de $CaCO_3$. Elle est soit sous la forme d'une roche friable, soit sous celle d'une roche solide. La marne solide est disposée sur le champ à amender en petits tas. Sous l'influence de l'humidité et des différences de température elle devient friable, s'émiette et peut ainsi être enfouie dans le sol.

La **chaux lacustre** (vase calcaire) renferme de 80 à 95 % de $CaCO_3$, elle se dépose dans les bassins fermés aux endroits asséchés, se compose presque complètement de particules de moins d'un millimètre. La chaux lacustre est un engrais calcique d'action rapide.

Les **tufs tourbeux**, tourbe des bas-fonds riche en chaux (de 10 à 50 % de $CaCO_3$). Ces tufs conviennent surtout pour le chaulage des terres acides, pauvres en matière organique et situées à proximité des gisements.

La **farine dolomitique naturelle** renferme, en plus de $CaCO_3$, du $MgCO_3$ (calculé en $CaCO_3$, 95 % et plus). C'est un engrais calcique particulièrement précieux pour beaucoup de cultures. Les matériaux calcaires renfermant du magnésium sont plus efficaces que les engrais calciques qui n'ont pas cet élément, surtout sur les sables et les limons sableux. Apportés aux sols, ils éliminent ou réduisent l'effet nuisible d'un excès de chaux sur la pomme de terre et le lin.

La **chaux éteinte** $Ca(OH)_2$ est obtenue par l'action de l'eau sur la chaux vive (CaO); c'est un engrais d'action rapide. Dans les premières années qui suivent son apport, elle est plus efficace que les autres matériaux calcaires, surtout sur les lourdes terres argileuses.

On peut aussi employer comme engrais calciques la cendre de schistes, les écumes de défécation et les scories. Outre la chaux, elles renferment d'autres éléments fertilisants et des oligo-éléments.

Détermination du besoin des sols en chaux et dosage de la chaux

Avant de chauler un champ, il faut déterminer le degré d'acidité du sol et son besoin en chaux, la dose de chaux en accord avec les particularités du sol et des plantes cultivées.

On peut juger de la décalcification du sol d'après certains signes extérieurs. C'est ainsi que les sols très acides sont ordinairement blanchâtres, leur horizon podzolique est bien marqué et atteint 10 cm d'épaisseur et plus. Sur les sols acides, les cultures exigeant une réaction neutre viennent mal, tandis que les plantes adventices acidophiles poussent en abondance. On détermine plus exactement le besoin des sols en chaux d'après la valeur de l'acidité d'échange (pH de l'extrait salin) et le degré de saturation des sols en bases (tableau 21). Pour déterminer la nécessité et le degré d'urgence d'un

Tableau 21

Degré de besoin des sols en chaux suivant le pH de l'extrait salin et le degré de saturation en bases

Degré de besoin en chaux	pH de l'extrait salin	Degré de saturation en bases, en %
grand	jusqu'à 4,5	jusqu'à 50
moyen	4,6-5,0	50-70
faible	5,1-5,5	plus de 70
nul	plus de 5,5	plus de 80

chaulage il importe de tenir compte des propriétés du sol et de la composition des cultures (tableau 22).

Tableau 22

Nécessité d'un chaulage suivant les propriétés des sols et la composition des plantes cultivées

Nécessité d'un chaulage suivant les propriétés du sol	Nécessité et degré d'urgence d'un chaulage suivant les propriétés des sols et la composition des cultures de l'assolement		
	grand pourcentage de lin et de pomme de terre	faible pourcentage de lin et de pomme de terre, de cultures potagères et fourragères	assolements avec cultures potagères et fourragères
forte	ont besoin (en premier lieu)	ont un fort besoin (en premier lieu)	ont un fort besoin (en premier lieu)
moyenne	ont un faible besoin (en second lieu)	ont besoin (en second lieu)	ont un fort besoin (en premier lieu)
faible	n'ont pas besoin	ont un faible besoin (en troisième lieu)	ont besoin (en second lieu)
nulle	idem	n'ont pas besoin	ont un faible besoin (en 3e lieu)

Sur la base de l'étude agrochimique du sol, les laboratoires agrochimiques remettent aux exploitations les cartes d'acidité (fig. 5) et leurs recommandations sur les chaulages des sols acides à effectuer.

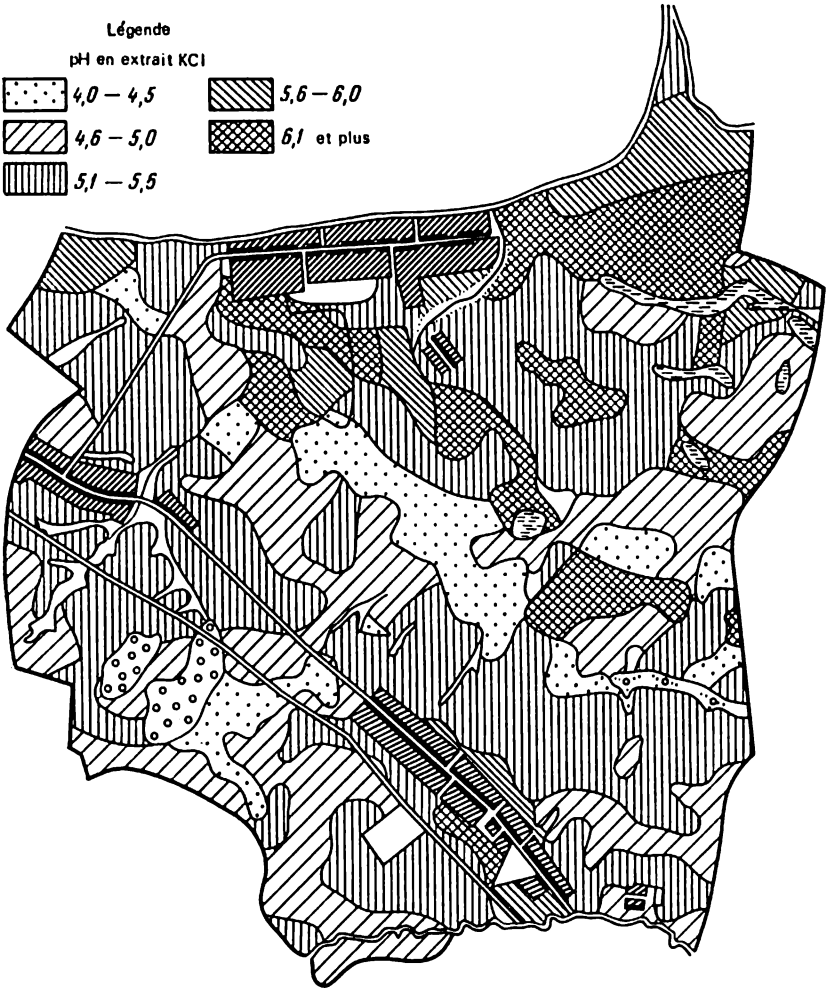


Fig. 5. Cartes de l'acidité du sol des champs d'une exploitation

Les doses de chaux sont calculées d'après le degré d'acidité du sol et sa composition mécanique.

Dans les sols podzoliques ne renfermant pas plus de 3 % de matière organique, on recommande les apports de chaux suivants (tableau 23).

La dose de chaux complète peut être établie plus exactement d'après l'acidité hydrolytique. Pour calculer la dose de chaux, la valeur de l'acidité hydrolytique en milliéquivalents pour 100 g de sol (H_n) est multipliée par le coefficient 1,5. Par exemple, si l'acidité hydrolytique du sol est égale à 4 mEq pour 100 g, la dose de $CaCO_3$ sera, par hectare, de $4 \times 1,5 = 6$ tonnes.

La dose d'engrais calciques concrets est calculée compte tenu de leur teneur en substances neutralisant l'acide (calculée en $CaCO_3$ pur) et de leur teneur en eau.

Quand on établit la dose de chaux dans des conditions concrètes, il faut prendre en considération la composition mécanique du sol et les particularités des plantes cultivées. Sur des sols lourds et sous

Tableau 23

Doses de chaux (en tonnes par hectare) suivant l'acidité d'échange et la composition mécanique du sol

Sols	pH de l'extrait salin					
	4,5 et moins	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4-5,5
Limons sableux et limons argileux légers	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,0-2,0
Limons argileux moyens et lourds	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5-4,0

des cultures très sensibles à un excès d'acidité (betterave, maïs, trèfle, luzerne, chou, etc.) il vaut mieux donner une dose complète de chaux calculée d'après l'acidité hydrolytique. Sur les sols plus légers, mal tamponnés, la dose doit être réduite d'un tiers.

Termes et procédés d'apport de la chaux

L'efficacité de la chaux dépend pour beaucoup de son épandage correct et de son mélange soigneux avec le sol. La chaux doit être bien émiettée et, avant d'être enfouie, régulièrement épandue à la surface du sol, ce qui se fait pour le mieux au moyen de semeuses spéciales, d'épandeurs. Les engrais calciques pulvérulents — chaux moulue, cendre de schistes, poudre de ciment et scories pulvérulentes sont apportées par des camions-citernes à ciment ou autres véhicules de ce genre. Il faut utiliser un procédé d'enfouissage permettant un contact intime de la chaux avec la couche arable tout entière. La dose totale, de même que la demi-dose, doit être enfouie lors du labour, préférablement avec les engrais organiques. La chaux vive et la chaux éteinte seront apportées séparément du fumier, afin d'éviter les pertes d'ammoniac. Quand on utilise à la fois la chaux et la farine de phosphorites, il vaut mieux enfouir cette dernière au moment du labour, tandis que la chaux, lors du binage ou d'autres façons superficielles.

Sur les prairies naturelles et les pâturages, la chaux est apportée en couverture. Elle augmente fortement la productivité des prairies artificielles, de telle sorte que non seulement le rendement augmente, mais aussi la composition des herbes fourragères s'améliore, ainsi que la valeur fourragère du foin et de la pâture. Le chaulage est une des mesures principales dans les prés dégénérés de pauvre valeur

fourragère et pour la création de prairies artificielles sur sols acides. La chaux est enfouie au moment du labour et d'autres travaux du sol. Etant donné que le système radiculaire de beaucoup d'herbes de prés et de pâturages se développe surtout dans les dix centimètres superficiels du sol, il est admissible d'apporter la chaux au moment de façons culturales superficielles. Quand on transforme les prés et les pâturages en prairies artificielles cultivées, il faut apporter, outre la chaux, la farine de phosphorites qu'on enfouit au labour, tandis que la chaux est apportée au moment des autres façons culturales.

Le chaulage est un moyen radical d'améliorer la fertilité des sols acides et d'augmenter la production agricole. L'efficacité économique du chaulage est déterminée d'après l'importance des frais qu'il occasionne et la valeur de la production additionnelle obtenue grâce à la chaux pendant toute la durée de son action. Les frais causés par les engrais calciques dépendent des matériaux utilisés, de la dose de chaux, du mode de transport et de sa durée, du stockage et de la technologie de leur emploi.

La structure des frais de chaulage comprend 80 à 90 % de déboursement pour le transport, le chargement et le déchargement, l'épandage. Le gain de rendement et l'efficacité de ce procédé varient largement suivant le degré d'acidité des sols, la dose de chaux et la composition de l'assolement. Il est économiquement plus avantageux d'utiliser une dose totale de chaux qu'une demi-dose.

Le revenu maximum et le remboursement des frais sont assurés avec des assolements comprenant des cultures qui poussent bien sur les sols acides chaulés.

Compte tenu de toute la durée de son action, chaque tonne de chaux apportée rapporte non moins de 6 à 7 q d'unités fourragères par hectare et assure 5 à 6 fois au moins le remboursement des frais de chaulage. Sur les sols moyennement et fortement acides, les frais de chaulage sont remboursés en 1,3 an par la production supplémentaire de céréales ; en moins d'un an par celle des plantes fourragères, pour la pomme de terre et les légumes, les frais sont remboursés de 3 à 5 fois dans l'année. Sur les sols faiblement acides, les frais sont remboursés en moitié plus de temps.

En U.R.S.S., de longues années d'expériences au champ ont montré que sur les podzols engazonnés chaque tonne de chaux assure un surplus de rendement (calculé en grain) de 9 q au moins à l'hectare pour toute une rotation d'assolement, les frais étant remboursés 12 à 13 fois. En plus d'une augmentation du rendement, le chaulage améliore l'assimilation par les plantes cultivées des éléments nutritifs du sol et des éléments fertilisants des engrais.

Le chaulage des sols moyennement et fortement acides fait augmenter de 35 à 50 % l'efficacité des engrais chimiques ; de 15 à 20 % sur les sols faiblement acides. Sur les terres chaulées les accroissements de rendement dus aux engrais organiques augmentent considérablement.

La basicité des sols sodiques et fortement sodiques est déterminée par la présence de cations sodium dans le complexe absorbant du sol et du bicarbonate dans la solution du sol.

Suivant la quantité de sodium absorbé les sols se divisent en faiblement sodiques renfermant 5 à 10 % de Na de la capacité d'échange totale; sodiques, renfermant 10 à 20 % de Na; et fortement sodiques, renfermant plus de 20 % de Na.

Suivant la profondeur de l'horizon sodique, les terres sodiques sont *corticales* quand l'horizon sodique ne dépasse pas une croûte de 7 cm de profondeur; *columnaires moyennes*, à 8-15 cm de profondeur et *columnaires profondes* quand l'horizon est à plus de 15 cm.

Les sols sodiques ont de mauvaises propriétés physiques: humides, ils gonflent et fondent et quand ils se dessèchent, ils durcissent, forment une croûte, se fendent en mottes; leur travail est difficile. La basicité des sols sodiques nuit aux plantes cultivées. L'horizon sodique compact empêche le système radiculaire de pénétrer en profondeur. Sur de tels sols le rendement est très faible.

Pour améliorer radicalement les sols sodiques renfermant plus de 10 % de Na de la capacité d'échange totale, un plâtrage est nécessaire.

L'apport de gypse au sol élimine le bicarbonate de sodium de la solution, tandis que le sodium absorbé par le sol est repoussé et remplacé par du calcium avec formation, dans la solution, d'un sel neutre, le sulfate de sodium:

$$Na_2CO_3 + CaSO_3 = CaCO_3 + Na_2SO_4;$$

$$(CAS)^{Na}_{Na} + CaSO_4 = (CAS)Ca + Na_2SO_4.$$

Quand une petite quantité de Na_2SO_4 se forme dans la solution, il n'est pas nocif pour les plantes, mais quand on plâtre les sols sodiques renfermant Na à plus de 20 % de la capacité d'échange, une grande quantité de sulfate de sodium se forme dans la solution; il est donc nécessaire de l'éliminer du sol par un lavage. Le plâtrage a pour résultat la suppression de la réaction alcaline des terres sodiques, l'amélioration des propriétés physiques, physico-chimiques et biologiques du sol, l'augmentation de sa fertilité.

On peut, pour plâtrer les sols, utiliser les matériaux suivants:

Gypse cru moulu $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, poudre fine grise ou blanche renfermant 71-73 % de $CaSO_4$.

Phosphogypse, résidu des usines d'engrais produisant des superphosphates, poudre très fine renfermant 70 à 75 % de $CaSO_4$ et 2-3 % de P_2O_5.

Argilogypse de gisements naturels, friable à l'état naturel, n'exigeant pas de mouture et renfermant de 63 à 92 % de $CaSO_4$ et de 1 à 19 % d'argile.

Suivant la quantité de Na absorbé et l'alcalinité du sol, la dose de gypse peut varier de 3 à 10 tonnes par hectare. Pour calculer

les doses de gypse, on se sert de la formule suivante:

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O \text{ (en tonnes par hectare)} = (Na - 0{,}01T) \cdot 0{,}086 \cdot H_n \cdot d_c,$$

où 0,086—1 milliéquivalent de $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ en grammes;

Na—la teneur de sodium absorbé dans 1 mEq pour 100 g de sol;

0,01 T—10 % de Na de la capacité d'échange (teneur admissible du sol en sodium absorbé);

H_n—profondeur de la couche arable, en cm;

d_c—masse du volume de sol de la couche plâtrée.

En culture irriguée, la dose de gypse peut être diminuée de 25-30 %. On peut apporter la dose entière de gypse en plusieurs reprises durant 2 ou 3 ans.

Sur les terres sodiques à croûte, le gypse est apporté après le labour et il est enfoui au cultivateur. Sur les sols sodiques columnaires profonds, quand l'horizon sodique est à plus de 15 cm, toute la dose de plâtre est épandue et enfouie à la charrue avec avant-corps. Quand l'horizon sodique est à 7-15 cm de profondeur, le gypse peut être apporté au moment des labours ou d'autres travaux du sol, ou bien en deux reprises: une demi-dose à chacun de ces travaux.

Les expériences ont montré que le plâtrage sans irrigation augmente en moyenne, dans la zone des terres noires de l'U.R.S.S., le rendement des céréales de 3 à 6 q; dans la zone des sols châtains, de 2 à 3 q à l'hectare. En culture irriguée, l'efficacité du plâtrage est encore plus grande. L'action du gypse augmente notablement quand on l'enfouit à l'occasion d'un binage profond en apportant en même temps du fumier, des composts, en recourant à l'engrais vert. Le plâtrage accroît l'efficacité des engrais organiques (tableau 24).

Tableau 24

Action du gypse associé au fumier et aux engrais minéraux sur le rendement du blé

Variantes de l'expérience	Sols sodiques columnaires moyens		Sols sodiques columnaires profonds	
	Rendement (q/ha)	Gain de rendement (q/ha)	Rendement (q/ha)	Gain de rendement (q/ha)
Témoin	1,7	—	4,5	—
Gypse 5 t + $N_{60}P_{60}$	9,5	7,8	12,6	8,1
Gypse 5 t + fumier 40 t	15,4	13,7	16,2	11,7
Gypse 10 t + fumier 40 t	12,1	10,4	18,6	14,1

Si, sous l'horizon sodique, se trouve à peu de profondeur un horizon riche en $CaCO_3$ ou en $CaSO_4$, on peut effectuer un défoncement au cours duquel cette couche est retournée et se mélange à l'horizon sodique. Ce procédé est appelé autoplâtrage des sols sodiques. Après l'apport de gypse ou le défoncement, un arrosage est désirable pour lessiver le sodium.

On observe pendant 8 à 10 ans l'influence bénéfique du plâtrage. Son action augmente chaque année en raison de l'interaction progressive du gypse avec le sol.

Le plâtrage ne se fait pas seulement pour l'amélioration chimique des sols sodiques, mais aussi, sur d'autres sols, pour améliorer l'alimentation en calcium et en soufre des plantes, surtout des légumineuses.

Ce sont les légumineuses et les crucifères qui sont les plus exigeantes en soufre. La répartition du soufre n'est pas la même dans tous les organes des plantes. Les graines et les feuilles, surtout jeunes, sont plus riches de cet élément que les tiges et les racines.

L'exportation du soufre par la récolte de céréales et de pommes de terre est de 7 à 15 kg, pour les légumineuses à grains et la betterave sucrière, de 20 à 30 kg, pour le turneps, le chou, les légumineuses herbacées (trèfle et luzerne), de 40 à 70 kg à l'hectare.

Différents sels d'acide sulfurique du sol servent à l'alimentation en soufre, ces sels sont absorbés dans la terre par les racines des plantes sous la forme de l'anion SO_4^{2-}. L anhydride sulfureux de l'atmosphère absorbé par les feuilles est aussi une source de soufre. Le soufre absorbé est réduit dans les tissus végétaux et entre dans la composition des protéines et autres composés organiques.

Dans le sol la majeure partie du soufre (70 à 90 %) se trouve sous une forme organique inassimilable. Ce sont surtout les sols légers, sables et limons sableux, qui en sont pauvres. Lorsque la matière organique se dégrade, le soufre des sols est oxydé jusqu'à SO_4^{2-} par des thiobacilles spécifiques. Ordinairement, la quantité de composés minéraux du soufre accessible aux plantes dans les sols n'est pas grande, ils entrent principalement dans la composition du gypse. Dans une grande mesure, les besoins des plantes en soufre sont satisfaits aux dépens de l'anhydride sulfureux atmosphérique, surtout dans les régions industrielles, ainsi qu'aux dépens du soufre des engrais organiques et minéraux (sulfate d'ammonium, superphosphate simple). Cependant, avec l'accroissement du rendement augmente aussi le besoin de soufre et la nécessité de son apport supplémentaire au sol. Or, le renouvellement des réserves de soufre du sol se trouve réduit en raison de la croissance continuelle de la production d'engrais chimiques complexes « sans lest » et hautement concentrés et de la réalisation de mesures contre la pollution de l'environnement (par SO_2, du nombre) causée par les usines.

Le gypse contient du calcium et du soufre, c'est pourquoi il est surtout employé comme engrais pour les légumineuses herbacées, trèfle et luzerne. Sur les herbes, il est épandu en couverture; sous les autres cultures, dans le sol à la dose de 3 à 4 q/ha. L'action bénéfique du gypse sur la croissance, le développement et le rendement des plantes sur sols acides est due à une meilleure alimentation en calcium et en soufre, à une plus grande résistance des plantes à l'acidité, la concentration du calcium dans la solution du sol étant plus élevée, à une plus grande assimilabilité du potassium.

CHAPITRE 4

LES ENGRAIS MINÉRAUX

On rassemble sous la dénomination d'engrais minéraux divers matériaux et substances organiques et minéraux renfermant des éléments nutritifs nécessaires aux plantes, mobilisant les substances nutritives des réserves du sol et améliorant les propriétés de celui-ci. D'après leur action, on distingue les engrais directs et indirects.

Les engrais d'*action directe* exercent une action directement bénéfique sur l'alimentation des plantes. L'apport de nitrate d'ammonium NH_4NO_3 améliore l'alimentation azotée des plantes, celui de superphosphate $Ca(H_2PO_4)_2$, l'alimentation en phosphore.

Les *engrais indirects* sont principalement utilisés pour améliorer les propriétés du sol, modifier la réaction de la solution, activer la mobilisation des réserves de substances nutritives du sol, c'est-à-dire qu'ils influent indirectement sur les conditions d'alimentation des plantes. Le gypse et les engrais calciques sont des engrais indirects.

Suivant leur origine, le procédé et le lieu d'extraction les engrais sont soit industriels, soit locaux.

Les engrais *industriels* comprennent presque tous les engrais minéraux obtenus soit par mouture, soit par traitement chimique des minerais agricoles dans des usines chimiques ou d'engrais, ainsi que les produits de l'industrie azotique synthétique et les déchets de l'industrie métallurgique ou autre.

Les *engrais locaux* sont obtenus sur le lieu de leur utilisation, dans les exploitations mêmes ou dans le voisinage. Ce sont le fumier, le purin, les fientes de volaille, les matières fécales, les composts, la tourbe, la vase d'étang, la cendre, les tufs calcaires, les engrais verts.

D'après leur composition chimique, les engrais sont dits minéraux ou organiques.

Les engrais minéraux contiennent des substances nutritives sous la forme de différents sels minéraux. Suivant les éléments nutritifs qu'ils renferment, les engrais sont subdivisés en engrais simples et complexes.

Les *engrais simples* ne renferment qu'un seul élément fertilisant. Ce sont les engrais azotés, phosphatés, potassiques et ceux renfermant des oligo-éléments.

Les *engrais complexes* renferment à la fois deux ou plusieurs éléments fertilisants (tableau 25).

Tableau 25

L'assortiment des engrais minéraux de l'U.R.S.S.
(en % de la production globale)

Sorte d'engrais	% de principe actif	1970	1975	1980
		Azotés		
Nitrate d'ammonium	35	45,0	44,7	40,1
Urée	46	27,3	25,9	27,1
Sulfate d'ammonium	20-21	7,3	6,8	5,1
Eau ammoniacale	16-20	} 14,4	} 10,9	} 7,1
Ammoniac liquide	82			
Complexes		5,0	10,7	19,3
Divers		1,0	1,0	1,3
		Phosphatés		
Simples		86,6	55,7	36,0
de ce nombre:				
Superphosphates simples	20	63,6	39,5	16,0
» binaires	45	21,3	15,2	19,5
Scories de déphosphoration	8-20	1,7	1,0	0,5
Complexes		11,2	36,5	54,5
de ce nombre:				
Ammophos		3,5	26,4	27,2
Nitroammophoska		1,5	2,4	11,9
Nitrophoska		1,9	1,6	4,0
Nitrophos		3,1	2,8	2,1
Nitroammophos		1,1	3,2	1,1
Complexes liquides		0,1		7,7
Phosphates fourragers		2,2	7,8	9,7
		Potassiques		
Chlorure de potassium	52-60	57,7	83,3	77,5
Sel potassique	40	27,9	5,4	4,1
Sulfate de potassium	45-52	—	1,4	1,5
Patentkali	26-28	1,9	1,2	1,4
Concentré magnésien potassique	—	1,7	1,4	—
Electrolyte	32	2,4	1,2	0,7
Kaïnite	8-12	5,7	1,6	—
Complexes	—	2,7	4,5	14,8

La teneur des engrais en élément fertilisant s'exprime en % du poids: pour les engrais azotés, calculée en N; pour les phosphatés, en P_2O_5; pour les potassiques, en K_2O. Afin de convertir en engrais réels la dose d'engrais en kilogrammes d'éléments fertilisants, la dose mentionnée de N, P_2O_5, K_2O est divisée par le pourcentage de la substance active dans les engrais correspondants. Par exemple, une dose de 70 kg de N par hectare représente $\frac{70}{34,5} \approx 2$ quintaux par hectare de nitrate d'ammonium renfermant 34,5 % d'azote.

Le rôle de l'azote. Sa teneur et ses transformations dans le sol

L'azote joue un rôle primordial pour l'augmentation des récoltes. D. Prianichnikov soulignait que la condition essentielle déterminant, à diverses époques, le niveau moyen des récoltes était le degré de ravitaillement des plantes cultivées en azote.

L'énorme importance des engrais azotés pour l'augmentation du rendement des plantes cultivées est due au rôle exceptionnel de l'azote dans la vie des plantes. Nous avons déjà vu que l'azote entre dans la composition des protéines, partie essentielle du cytoplasme et du noyau cellulaire, dans la composition des acides nucléiques, de la chlorophylle, des enzymes, des phosphatides, de la majorité des vitamines et d'autres composés azotés dont le rôle est capital pour le métabolisme des plantes.

Ce sont les sels de l'acide azotique et les sels d'ammonium qui constituent, pour les plantes, la source principale d'azote. Dans les conditions naturelles, l'alimentation azotée des plantes se fait par absorption, à partir de la solution du sol, de l'anion NO_3^- et du cation NH_4^+, dissous dans la solution ou à l'état absorbé échangeable. Dans les plantes, les formes minérales de l'azote passent par un cycle de transformation complexe pour faire finalement partie des composés organiques azotés: acides aminés, amides et, enfin, protéines. La synthèse des composés organiques azotés se fait par l'intermédiaire de l'ammoniac, leur dégradation aboutit à sa formation. D. Prianichnikov a très bien dit que l'ammoniac est « l'alpha et l'oméga du métabolisme des substances azotées des plantes ».

L'azote nitrique n'est pas directement utilisé par les plantes dans les processus synthétiques.

Dans les plantes, les nitrates subissent par l'intermédiaire des enzymes une réduction graduelle en passant par les formes nitreuses, hyponitreuses, les hydroxylamines pour aboutir à l'ammoniac:

$$\underset{\text{azote nitrique}}{HNO_3} \rightarrow \underset{\text{azote nitreux}}{HNO_2} \rightarrow \underset{\text{azote hyponitreux}}{(HNO)_2} \rightarrow \underset{\text{hydroxylamine}}{NH_2OH} \rightarrow \underset{\text{ammoniac}}{NH_3}.$$

La réduction biologique des nitrates a lieu avec l'aide d'enzymes renfermant les oligo-éléments: molybdène, cuivre, fer, manganèse, et exige des dépenses d'énergie accumulée dans les plantes, la réduction des nitrates se fait à mesure que l'ammoniac formé est utilisé pour la synthèse des composés azotés organiques. Les nitrates ne sont pas nuisibles aux plantes et ils peuvent s'emmagasiner dans les tissus en quantités importantes. Cependant, une teneur en nitrates de la production agricole supérieure à une certaine limite peut être toxique pour l'homme et les animaux.

Les acides aminés qui se trouvent dans les plantes partiellement à l'état libre et principalement dans la composition des protéines se forment essentiellement par amination des acides cétoniques organiques, produits de l'oxydation incomplète des glucides.

Dans les plantes, l'azote ammoniacal formé par réduction des nitrates se combine avant tout avec les acides acéto-oxalique, céto-glutarique et furamique pour former des amino-acides aspartique et glutamique.

$$\underset{\text{acide acéto-oxalique}}{COOHCOCH_2COOH} \xrightarrow[-H_2O]{+NH_3+H_2} \underset{\text{acide aspartique}}{COOHCHNH_2CH_2COOH};$$

$$\underset{\text{acide cétoglutarique}}{COOHCOCH_2CH_2COOH} \xrightarrow[-H_2O]{+NH_3+H_2} \underset{\text{acide glutamique}}{COOHCHNH_2CH_2CH_2COOH};$$

$$\underset{\text{acide furamique}}{COOHCH=CHCOOH} \xrightarrow{+NH_3} \underset{\text{acide aspartique}}{COOHCH_2CHNH_2COOH}.$$

Le vaste assortiment d'acides aminés entrant dans la composition des protéines est synthétisé par transamination des acides aspartique et glutamique et de leurs amides, asparagine et glutamine, ainsi que par certaines autres réactions spécifiques. Au cours de la transamination, sous l'influence d'enzymes appropriés, les transaminases, les radicaux amines de ces composés sont transférés à d'autres acides cétoniques :

$$\underset{\text{acide aspartique}}{COOHCH_2CHNH_2COOH} + \underset{\text{acide pyruvique}}{CH_3COCOOH} \rightarrow$$

$$\rightarrow \underset{\text{acide acéto-oxalique}}{COOHCH_2COCOOH} + \underset{\text{alanine}}{CH_3CHNH_2COOH};$$

$$\underset{\text{acide glutamique}}{COOHCH_2CH_2CHNH_2COOH} + \underset{\text{acide pyruvique}}{CH_3COCOOH} \rightarrow$$

$$\rightarrow \underset{\text{acide cétoglutarique}}{COOHCH_2CH_2COCOOH} + \underset{\text{alanine}}{CH_3CHNH_2COOH}.$$

Les réactions de désamination des acides aminés, c'est-à-dire de détachement du radical amine des acides aminés avec formation d'ammoniac et de l'acide cétonique correspondant sont d'une grande importance pour le métabolisme de l'azote et des glucides dans les plantes. L'ammoniac est de nouveau utilisé pour l'amination des acides cétoniques et l'acide cétonique libéré s'inclut dans le cycle de la transformation des glucides.

$$\underset{\text{acide aspartique}}{COOHCH_2CHNH_2COOH} \xrightarrow[-H_2]{+H_2O} \underset{\text{acide acéto-oxalique}}{COOHCH_2COCOOH} + NH_3;$$

$$\underset{\text{alanine}}{CH_3CHNH_2COOH} \xrightarrow[-H_2]{+H_2O} \underset{\text{acide pyruvique}}{CH_3COCOOH} + NH_3.$$

Les amides asparagine et glutamine formés par l'addition d'une autre molécule d'ammoniac aux acides aspartique et glutamique jouent un rôle particulier dans le métabolisme azoté des plantes.

$$\underset{\text{acide aspartique}}{COOHCH_2CHNH_2COOH} \xrightarrow[-H_2O]{+NH_3} \underset{\text{amide de l'acide aspartique (asparagine)}}{CONH_2CH_2CHNH_2COOH};$$

$$\underset{\text{acide glutamique}}{COOHCH_2CH_2CHNH_2COOH} \xrightarrow[-H_2O]{+NH_3} \underset{\text{amide de l'acide glutamique (glutamine)}}{CONH_2CH_2CH_2CHNH_2COOH}.$$

Les recherches de D. Prianichnikov ont permis d'établir que la formation des acides neutralise l'ammoniac accumulé dans les plantes par désamination des acides aminés ou alimentation ammoniacale de luxe, en présence d'une insuffisance de glucides.

En pénurie de glucides et, par conséquent, d'acides organiques cétoniques (surtout au moment de la germination des graines pauvres en réserves de glucides, graines de betterave sucrière, par exemple) une alimentation excessive de la plante en azote ammoniacal peut être néfaste. Dans ce cas, l'azote ammoniacal n'a pas le temps d'être utilisé pour la synthèse des acides aminés et il s'accumule dans les tissus, provoquant une intoxication. Les plantes renfermant beaucoup de glucides dans les semences (par exemple, de l'amidon pour la pomme de terre) assimilent rapidement l'azote ammoniacal et répondent bien à un apport d'engrais ammoniacaux.

La biosynthèse des protéines composées d'acides aminés réunis entre eux par des liaisons peptidiques se fait avec la participation des acides nucléiques qui jouent le rôle d'une matrice sur laquelle se fixent et se réunissent les acides aminés pour former les différentes molécules de protéines.

Au cours de leur croissance et de leur développement, une énorme quantité de protéines diverses se synthétise sans cesse dans les plantes. Elles diffèrent par leur masse moléculaire, la composition de leurs acides aminés et l'ordre de succession de ceux-ci dans les chaînes polypeptidiques, par leurs propriétés fonctionnelles. Les protéines synthétisées aux différentes phases de développement des plantes, de même que les protéines de divers organes et cellules, présentent des distinctions qualitatives. La biosynthèse des protéines, ainsi que d'autres composés organiques complexes, exige la dépense d'une grande quantité d'énergie. Les principales sources de celle-ci dans les plantes sont la photosynthèse et la respiration (phosphorylation oxydative), c'est pourquoi il existe un lien étroit entre la synthèse des protéines, d'une part, l'intensité de la respiration et de la photosynthèse, de l'autre.

Les plantes sont le siège non seulement de la synthèse, mais aussi d'une décomposition des protéines en acides aminés avec libération d'ammoniac sous l'influence d'enzymes protéolytiques. Dans les jeunes organes et plantes en pleine croissance, la synthèse protéique

surpasse la dégradation, au fur et à mesure du vieillissement, les processus de désintégration s'accélèrent et commencent à dominer sur la synthèse.

Aux diverses phases de croissance et de développement, la marche des processus du métabolisme des matières azotées n'est pas la même. La germination s'accompagne de la désagrégation des protéines de réserve de l'endosperme ou des cotylédons et les produits de l'hydrolyse sont utilisés pour l'édification des protéines. Une fois formé, l'appareil de photosynthèse des feuilles, l'alimentation de la plante et la synthèse des protéines se font aux dépens de l'azote minéral exogène. C'est dans la période de croissance maximale et de formation des organes végétatifs, tiges et feuilles, que les plantes absorbent et assimilent le plus d'azote à partir du milieu environnant. Des vieilles parties des plantes, dans lesquelles prédominent les processus de dégradation des protéines, les produits de leur hydrolyse passent dans les jeunes organes en pleine croissance. Lorsque les graines se forment, les substances protéiques des organes végétatifs sont hydrolysées et les produits formés se déplacent dans les organes reproducteurs où ils sont réutilisés pour la synthèse des protéines.

A ce moment l'assimilation de l'azote du sol par les plantes diminue ou s'arrête presque totalement.

Par leurs travaux, D. Prianichnikov et ses élèves ont montré que l'azote ammoniacal et l'azote nitrique sont, dans certaines conditions, des sources d'alimentation d'égale valeur pour les plantes. Les plantes utilisent de préférence l'azote ammoniacal ou l'azote nitrique en raison de certains facteurs dont les principaux sont: les particularités biologiques de la culture, une alimentation suffisante en glucides, la réaction du milieu, la présence de calcium, de potassium et autres éléments nutritifs, les oligo-éléments du nombre. En réaction neutre, l'azote ammoniacal est mieux assimilé par les plantes; en réaction acide, il l'est moins bien que l'azote nitrique. Une abondance de calcium, de magnésium et de potassium crée des conditions plus favorables à une meilleure assimilation de l'azote ammoniacal, tandis que si l'on donne l'azote nitrique, il faut veiller à assurer un niveau suffisant d'alimentation en phosphore. Une déficience en molybdène ralentit la restauration des nitrates et limite l'assimilation de l'azote nitrique par les plantes. Dans les conditions naturelles, la valeur relative pour les plantes des formes nitrique et ammoniacale des engrais azotés est déterminée pour beaucoup par leur comportement et leurs transformations dans le sol et par les propriétés de celui-ci.

Les **conditions de l'alimentation azotée** exercent une grande influence sur la croissance et le développement des plantes. Quand les plantes reçoivent suffisamment d'azote, la synthèse des substances azotées organiques est stimulée. Les plantes forment un puissant appareil de feuilles et de tiges d'un beau vert, poussent et tallent bien; les organes de la fructification se forment et se développent

mieux. Finalement, la récolte et sa teneur en protéines augmentent fortement.

Dans l'excès d'une forme d'azote, la maturation des plantes est retardée, elles produisent une forte masse végétative, mais il y a peu de grains, peu de tubercules et de maigres plantes-racines; chez les céréales et le lin, un excès d'azote peut provoquer la verse.

En pénurie d'azote, la croissance des plantes est fortement retardée, les feuilles sont petites, vert pâle en raison d'un trouble de la synthèse de la chlorophylle, elles jaunissent prématurément, les tiges sont grêles et ramifient peu. La formation et le développement des organes reproducteurs, le gonflement du grain souffrent aussi, la récolte baisse nettement, ainsi que sa teneur en protéine.

Teneur des plantes en azote. C'est dans les graines, sous forme de protéines qu'il y a le plus d'azote (jusqu'à 90 % du total). Les protéines végétales contiennent de 14 à 18 % d'azote, ce qui fait 16 % en moyenne.

La qualité de la production agricole est souvent appréciée d'après l'indice « protéine brute » sous lequel on comprend la somme des composés azotés dont la majeure partie appartient aux protéines. On calcule la protéine brute en multipliant la quantité totale d'azote dans les plantes par le coefficient 6,25.

Ce sont les graines des légumineuses et des plantes oléagineuses qui sont les plus riches en azote; il y en a moins dans le grain des céréales. Les organes végétatifs des plantes renferment beaucoup moins d'azote que les graines. C'est ainsi que la teneur du grain de blé en azote est de 2,3 à 3,5 % de la matière sèche, alors que celle de la paille est de 0,4 à 0,7 %. Parmi les organes végétatifs, ce sont les feuilles, surtout les jeunes, qui contiennent le plus d'azote; il y en a moins dans les tiges et les racines. L'azote non protéique peut se trouver en quantité importante dans les feuilles et les tiges des plantes, ainsi que dans les tubercules et les plantes-racines. Ainsi, dans les légumes-feuilles, les racines de la betterave sucrière, fourragère et de la carotte, dans les tubercules de la pomme de terre ayant atteint leur maturité marchande, les composés non protéiques de l'azote constituent la moitié de la quantité totale de cet élément. Les plantes prélèvent sur le sol une importante quantité d'azote: les céréales, environ 100 kg, le maïs, la pomme de terre, la betterave sucrière jusqu'à 150-200 kg par hectare.

La **teneur des sols en azote** dépend de la quantité d'humus qu'ils contiennent. Les chernozems en contiennent au total jusqu'à 0,4-0,5 %, tandis que les sols peu humifiés (podzols engazonnés et terres grises) n'en renferment que 0,05-0,15 %. Dans la couche arable des divers sols, la réserve totale d'azote varie entre 1500 et 15 000 kg à l'hectare.

La masse essentielle de l'azote du sol (jusqu'à 99 %) se trouve sous la forme de composés organiques (substances protéiques et humiques) inassimilables pour les plantes. La vitesse de la minéralisation des composés azotés organiques par les micro-organismes du

sol jusqu'au stade de l'ammoniac et des nitrates dépend des conditions d'aération, de l'humidité, de la température et de la réaction du sol. C'est ce qui explique que la quantité des composés minéraux de l'azote dans les sols varie fortement : de quelques traces jusqu'à 2-3 % de l'azote total.

La décomposition des substances organiques azotées dans le sol peut, sous son aspect général, être représentée par le schéma : substances humiques, protéines → acides aminés, amides → ammoniac → composés nitreux → nitrates → azote moléculaire.

La dégradation des substances organiques azotées du sol jusqu'à l'ammoniac s'appelle *ammonification*. Ce processus est réalisé par une multitude de micro-organismes aérobies et anaérobies du sol et se déroule dans toutes les terres à n'importe quelle réaction du milieu, mais se ralentit en conditions anaérobies et lorsque la réaction est fortement acide ou basique.

Dans le sol, l'azote ammoniacal subit la *nitrification*, une oxydation jusqu'à formation de nitrites, puis de nitrates. Ce processus est dû à l'activité d'un groupe de bactéries aérobies spécifiques pour lesquelles l'oxydation de l'azote est une source d'énergie. Les conditions optimales pour la nitrification sont une bonne aération, une humidité du sol de 60 à 70 % de la capacité en eau capillaire, une température de 25 à 32 °C et une réaction proche de la neutralité. L'intensité de la nitrification est un des indices de l'état cultural du sol, sa faculté de nitrification caractérise dans une certaine mesure son degré de fertilité effective.

Lorsque la réaction des sols est acide, l'aération mauvaise, l'humidité excessive et la température basse, les processus de minéralisation se font lentement et s'arrêtent à l'étape de la formation de l'ammoniac. En raison des conditions défavorables à l'activité des bactéries nitrifiantes, la nitrification est lente et réprimée.

Sur les sols cultivés et bien travaillés, l'ammonification et la nitrification se font avec plus d'intensité, il se forme davantage de composés minéraux azotés, surtout de nitrates. Le chaulage des sols acides, l'apport systématique d'engrais minéraux et organiques stimulent les activités microbiennes dans le sol, l'intensité de la minéralisation de la matière organique et la formation de composés azotés assimilables.

Les composés minéraux de l'azote ne s'accumulent pas en grandes quantités dans le sol, car ils sont utilisés par les plantes, ainsi que par les micro-organismes et reprennent en partie la forme organique.

Les engrais azotés stimulent la minéralisation de la matière organique du sol et contribuent pour beaucoup à l'assimilation de l'azote du sol par les plantes. Récemment encore, on estimait que les plantes utilisent 70 à 80 % de l'azote des engrais. Le coefficient d'utilisation de l'azote des engrais par les plantes était évalué d'après la différence entre l'exportation d'azote par la récolte avec ou sans apport d'azote. Il était admis que, dans l'un et l'autre cas, les plantes assimilent la même quantité d'azote du sol. L'usage des

isotopes dans les recherches agrotechniques (on a utilisé dans les expériences les composés azotés marqués à un isotope stable de l'azote ^{15}N) a permis d'établir qu'en champ, les plantes n'assimilent directement des engrais que 30 à 50 % d'azote. Les coefficients d'utilisation de l'azote des différentes formes d'engrais azotés ne diffèrent pas sensiblement, sauf quand les conditions de leur utilisation sont extrémales. Les différences entre les quantités d'azote d'engrais utilisées déterminées par la méthode des différences et son assimilation réelle caractérisent le supplément d'assimilation de l'azote du sol lorsque des engrais azotés sont apportés. Il s'est avéré, de plus, que 10 à 20 % de l'azote des engrais nitriques et 30 à 40 % de l'azote des engrais ammoniacaux et de l'urée se trouvent fixés dans le sol sous une forme organique. La transformation de l'azote en une forme organique augmente fortement lorsqu'on enfouit dans le sol au labour une matière organique à faible teneur en azote (débris des chaumes, paille de céréales et fumier de paille). L'azote fixé se minéralise lentement et le posteffet des engrais azotés est insignifiant.

Par conséquent, en plus de la minéralisation de la matière organique il se produit dans le sol une refixation des composés minéraux azotés sous une forme organique. Pourtant, l'azote ne se perd pas, il passe seulement à une forme inaccessible aux végétaux pour le moment. Le rapport entre les processus de minéralisation et de formation de nouvelles substances organiques azotées est d'une grande importance pour le régime de l'azote des sols.

Quant à la fixation dans le sol de l'azote des nitrates, c'est l'absorption biologique qui a, comme nous l'avons vu, une importance particulière. Tous les sels de l'azote nitrique sont hydrosolubles, les nitrates circulent aisément dans le sol et peuvent être entraînés du sol végétal par les précipitations et les eaux de drainage. Ordinairement, dans les sols lourds, le lessivage des nitrates de sous les racines est insignifiant. Cependant, dans les sols légers, surtout en jachère, en régions humides, ainsi qu'en agriculture irriguée, de telles pertes peuvent devenir importantes.

Les pertes d'azote du sol et des engrais sont dues principalement à la *dénitrification*, processus de réduction de l'azote nitrique jusqu'à l'azote moléculaire libre (N_2) ou jusqu'aux oxydes d'azote gazeux (NO et N_2O). La dénitrification biologique est réalisée par un groupe de bactéries dénitrifiantes; elle est particulièrement intense en conditions anaérobies, en réaction alcaline du sol et en présence de matière organique riche en cellulose. La dénitrification biologique a aussi lieu dans les conditions ordinaires de réaction du milieu, d'aération et d'humidité étant donné qu'il existe inévitablement dans le sol des microzones anaérobies et que la gamme de réaction favorable au développement des bactéries dénitrifiantes est assez large. La dénitrification indirecte ou chimique est en rapport avec la formation d'oxydes d'azote gazeux et d'azote moléculaire lors de l'interaction chimique des produits intermédiaires de

la nitrification entre eux et avec la matière organique du sol, ainsi que par décomposition de l'acide nitrique (surtout en réaction acide). De grandes pertes d'azote sont observées dans la dénitrification des nitrates formés au cours de la nitrification de l'azote ammoniacal du sol, des engrais ammoniacaux et de l'urée, ainsi qu'à partir des engrais azotés nitriques. Les recherches au moyen de ^{15}N ont montré que les pertes d'azote par les engrais ammoniacaux atteignent 10 à 20 %, celles des engrais nitriques, 15 à 30 % de la quantité apportée. En jachère, les pertes d'azote des engrais augmentent fortement pour atteindre 40 à 50 %.

Par conséquent, à côté d'un rôle positif, les processus de nitrification jouent, dans le cycle de l'azote en agriculture, un rôle négatif, car les nitrates formés peuvent être lessivés, ou bien quitter le sol sous forme de produits gazeux de la nitrification. Un des moyens pour réduire les pertes d'azote du sol et des engrais par dénitrification et lessivage des nitrates est d'employer des inhibiteurs de la nitrification. Ces produits ralentissent la nitrification et maintiennent l'azote minéral du sol et des engrais sous sa forme ammoniacale. L'usage d'inhibiteurs de la nitrification est particulièrement efficace en agriculture irriguée sous le cotonnier et dans les rizières, ainsi que sur les sols plus légers dans les zones modérément ou très humides.

Quand les engrais ammoniacaux solides et l'urée sont apportés en couverture, il y a perte d'azote sous formes d'ammoniac, surtout sur les terres alcalines et carbonatées. Même un simple grattage destiné à enfouir les engrais permet d'éliminer de telles pertes.

Les pertes d'azote sont fortement réduites avec une utilisation correcte des engrais minéraux et organiques, associée à un système rationnel de travail de la terre et d'arrosage.

L'azote assimilé par les plantes ne revient qu'en partie au sol avec le fumier; une partie d'azote entrant dans la composition de la production marchande (grain, fibres du lin, tubercules de la pomme de terre, etc.) est exportée du sol.

Afin de s'assurer de bonnes récoltes, il faut constamment prendre soin de renouveler la réserve d'azote du sol.

La seule source naturelle de renouvellement des stocks d'azote du sol est l'azote atmosphérique.

Au-dessus de chaque hectare de terrain, l'atmosphère renferme environ 80 000 tonnes d'azote, mais l'azote atmosphérique moléculaire est, dans les conditions naturelles, inaccessible à la plupart des plantes.

La fixation de l'azote moléculaire de l'atmosphère et le renouvellement des stocks d'azote dans le sol se font de deux façons. Une petite quantité d'azote fixée (de 3 à 5 kg par ha) est formée dans l'atmosphère sous l'action de la foudre et pénètre dans le sol avec les précipitations sous la forme d'acide nitrique ou d'acide nitreux. La fixation de l'azote par les bactéries fixatrices d'azote vivant librement dans le sol (azotobacter, clostridium, etc.) et par les

bactéries des nodosités en symbiose avec les légumineuses (synthèse biologique de l'azote) est d'une grande importance pour l'alimentation des plantes.

Les bactéries fixatrices d'azote vivant librement assimilent jusqu'à 5 kg d'azote par hectare. La fixation symbiotique de l'azote dépend de l'espèce de légumineuses. Ainsi, le trèfle peut accumuler 150 à 160 kg d'azote, le lupin, 100 à 170 kg, la luzerne, 250 à 300 kg, le soja, 100 kg, le pois, la vesce, le haricot, 70 à 80 kg par hectare. Environ un tiers de l'azote fixé par les légumineuses reste dans les résidus, les chaumes et les racines et, après minéralisation, peut être utilisé par les cultures succédant aux légumineuses dans l'assolement.

Pour obtenir une bonne récolte, il est d'une grande importance d'apporter au sol des engrais minéraux azotés obtenus dans les usines chimiques par synthèse à partir de l'azote atmosphérique. Pour la plupart des sols de l'Union Soviétique et surtout les podzols engazonnés, les sols gris forestiers, les terres grises, les chernozems lessivés, les engrais azotés jouent un rôle décisif pour l'augmentation des récoltes. Ils donnent les plus grands gains (tableau 26).

Tableau 26

Effet des engrais minéraux sur le rendement de la pomme de terre

Sols	Nombre d'expériences	Rendement sans fumier et sans engrais (q/ha)	Gain de récolte (en q/ha) dû aux engrais			
			minéraux complets	azotés	phosphatés	potassiques
Limons sableux podzoliques	23	117	60	35	13	16
Limons argileux podzoliques	8	154	69	39	18	28
Gris forestiers	6	159	73	43	10	9
Chernozems lessivés	10	203	56	31	20	13

Les engrais azotés sont apportés à toutes les cultures, à l'exception des légumineuses dont les besoins en azote sont satisfaits grâce à la fixation de l'azote atmosphérique par les bactéries des nodosités. La majeure partie des engrais azotés est réservée aux principales cultures industrielles: coton, betterave sucrière, lin, chanvre, thé.

Une augmentation rapide de la production des engrais azotés a permis de les utiliser les dernières années non seulement sous les cultures industrielles, mais aussi sur de grandes superficies de céréales et de cultures fourragères.

C'est le nitrate d'ammonium et l'urée qui occupent la première place dans l'assortiment d'engrais azotés produits en U.R.S.S. (72 % de la production totale). Ce sont les formes concentrées qui ont prédominé en 1980: urée, nitrate d'ammonium, ammoniac

anhydre et engrais complexes, la part des engrais pauvres en ces substances a été insignifiante.

Les engrais azotés se subdivisent en quatre groupes:

Les *nitrates* renfermant de l'azote nitrique, $NaNO_3$, $Ca(NO_3)_2$.

Les *engrais ammoniacaux* et *composés de l'ammonium* renfermant l'azote respectivement sous la forme ammoniacale ou d'ammonium $(NH_4)_2SO_4$, NH_4Cl et les engrais azotés liquides.

Les *engrais nitriques-sels d'ammonium* renfermant de l'azote ammoniacal et nitrique, NH_4NO_3.

Les *engrais renfermant de l'azote* sous la forme amide $CO(NH_2)_2$.

La production des diverses formes d'engrais azotés repose principalement sur l'obtention d'ammoniac synthétique à partir de l'hydrogène et de l'azote moléculaire. L'azote est obtenu en faisant passer de l'air dans un générateur renfermant du coke brûlant, tandis que la source d'hydrogène est le gaz naturel, les gaz de pétrole et de coke. Du mélange N_2 et H_2 (dans le rapport 1 : 3) à haute température et haute pression en présence de catalyseurs, on obtient l'ammoniac:

$$N_2+3H_2=2NH_3.$$

L'ammoniac synthétique est utilisé non seulement pour la production de sels d'ammonium, mais aussi d'acide nitrique servant à la fabrication d'engrais ammoniacaux-nitriques et nitriques.

Les engrais nitriques

Les engrais nitriques, nitrates de sodium et de calcium, constituent en U.R.S.S. une petite part (moins de 1 %) des engrais azotés produits. Cependant, l'étude de leurs propriétés et de leurs transformations dans le sol permet de mieux comprendre les particularités de l'emploi de l'urée et des engrais ammoniacaux nitriques.

Le *nitrate de sodium* ($NaNO_3$) renferme de 15 à 16 % d'azote.

Avant la mise au point de la méthode synthétique d'obtention de l'ammoniac, le nitrate de sodium extrait des gisements naturels de guano au Chili était le principal engrais azoté. Le nitrate de sodium actuellement fabriqué est un sous-produit de la fabrication de l'acide nitrique à partir d'ammoniac. C'est un sel cristallin fin et blanc ou jaune brun, bien soluble dans l'eau. D'une hygroscopicité bien marquée, il peut s'agglutiner dans de mauvaises conditions de stockage. Mais convenablement conservé, il ne s'agglutine pas et conserve une bonne dispersibilité.

Le *nitrate de calcium* $Ca(NO_3)_2$ renferme 13 à 15 % d'azote. On l'obtient en neutralisant l'acide nitrique par de la chaux. C'est un sel cristallin blanc, bien soluble dans l'eau. Son hygroscopicité est élevée et même dans des conditions normales de stockage, il prend l'humidité, fond, s'agglutine. On le conserve et le transporte en emballages imperméables spéciaux. Il est livré en granulés enrobés d'un hydrofuge appelé à diminuer son hygroscopicité.

Cependant, les granulés ne sont pas entièrement dépourvus des propriétés physiques défavorables de l'engrais.

Les nitrates de sodium et de calcium sont des engrais physiologiquement alcalins. A partir de ces sels, les plantes consomment davantage d'anions NO_3^- que de cations Na^+ ou Ca^{2+} qui, restant dans le sol, font dévier la réaction vers l'alcalinisation. Employés systématiquement sur sol acide, ces engrais abaissent l'acidité du sol.

C'est le nitrate de calcium qui fournit des résultats particulièrement bons sur les sols acides pauvres en bases. Son apport fait diminuer l'acidité du sol et améliore ses propriétés physiques, car le calcium coagule les colloïdes du sol.

Les nitrates se dissolvent rapidement dans le sol et participent à des réactions d'échange avec les cations du complexe absorbant :

$$(CAS)\begin{matrix}Ca\\Ca\end{matrix} + 2NaNO_3 \rightleftharpoons (CAS)\begin{matrix}Na\\Ca\end{matrix}Na + Ca(NO_3)_2;$$

$$(CAS)\begin{matrix}H\\H\end{matrix}H + Ca(NO_3)_2 \rightleftharpoons (CaS)\begin{matrix}Ca\\H\end{matrix} + 2HNO_3.$$

Les cations Na^+ et Ca^{2+} sont absorbés par le sol, tandis que les anions NO_3^- restent dans la solution et conservent une grande mobilité. C'est pourquoi, dans un climat humide ou en irrigation abondante, surtout sur des sols légers, l'azote nitrique n'est pas retenu.

Il n'est pas recommandé d'apporter les engrais nitriques longtemps avant les semis. Un bon procédé est d'utiliser ces engrais en fumure complémentaire et le nitrate de sodium, au moment des semis ou des plantations sur lignes ou en poquets. (Le nitrate de calcium convient moins bien pour un épandage sur lignes à cause de ses propriétés physiques peu favorables.)

Les engrais nitriques peuvent être utilisés sur différents sols et pour toutes les cultures. Sur terres acides, surtout quand les cultures sont sensibles à une acidité élevée, les engrais nitriques donnent de meilleurs résultats que les engrais ammoniacaux. Sur les chernozems, ils ne présentent pas d'avantages.

Le nitrate de sodium convient mal aux sols salifères et sodiques; il le cède en efficacité au nitrate de calcium sur les sols acides. Sur les chernozems, ces formes d'engrais sont à peu près de même valeur pour la plupart des cultures. La plus grande efficacité du nitrate de sodium pour les cultures de betterave sucrière, de plantes-racines fourragères ou potagères s'explique par l'effet positif du cation sodium. Il active la circulation des glucides depuis les feuilles vers les racines, d'où une meilleure récolte de racines ayant un taux de sucre plus élevé.

Les engrais ammoniacaux et à base de sels d'ammonium

Les engrais solides sels d'ammonium sont fabriqués en proportion relativement faible de la production globale des engrais azotés (7 à 8 % en U.R.S.S.).

Les engrais solides sels d'ammonium. Le *sulfate d'ammonium* $(NH_4)_2SO_4$ renferme 20,8-21 % d'azote. C'est un sel cristallin bien soluble dans l'eau, son hygroscopicité est très faible, c'est pourquoi il agglutine peu en conditions de stockage normales et conserve une bonne dispersibilité. On l'obtient par saturation d'acide sulfurique fort par l'ammoniac gazeux. Pour la fabrication de sulfate d'ammonium, on peut utiliser l'ammoniac synthétique, de même que l'ammoniac formé par cokéfaction de la houille. Le produit fini peut renfermer une petite quantité d'acide sulfurique libre (0,2-0,4 %) et d'autres impuretés.

Le sulfate d'ammonium synthétique est blanc, tandis que celui obtenu par chimie de coke est gris, bleuâtre ou rougeâtre en raison de la présence d'impuretés organiques.

L'engrais renferme environ 24 % de soufre, il est assez riche en cet élément pour l'alimentation des plantes.

Le *sulfate d'ammonium-sodium* $(NH_4)_2SO_4 + Na_2SO_4$, renferme 16 % d'azote; c'est un déchet de la production du caprolactame. Ses propriétés physiques sont satisfaisantes, son hygroscopicité est faible et il ne s'agglutine pas.

Le *chlorure d'ammonium* NH_4Cl renferme 24 à 26 % d'azote. C'est un produit secondaire de la fabrication de la soude. Sel cristallin blanc, bien soluble dans l'eau, ayant de bonnes propriétés physiques. Le chlorure d'ammonium renferme beaucoup de chlore (67 %) et ne convient pas aux cultures sensibles envers cet élément, mais donne de bons résultats en riziculture.

Le sulfate et le chlorure d'ammonium sont des engrais physiologiquement acides, car les plantes en consomment plus rapidement et en plus grande quantité les cations NH_4^+ que les anions SO_4^{2-} ou Cl^-. Employés une seule fois en doses modérées ces engrais n'acidifient pas notablement le sol mais utilisés systématiquement, surtout sur des sols mal tamponnés, ils provoquent une acidification marquée. Enfouis dans le sol, les engrais à sels d'ammonium sont rapidement dissous dans l'eau du sol et entrent en réactions d'échange avec les cations du complexe absorbant:

$$(CAS)\begin{matrix}Ca\\Ca\end{matrix} + (NH_4)_2SO_4 \rightleftharpoons (CAS)\begin{matrix}NH_4\\Ca\end{matrix} + CaSO_4;$$

$$(CAS)\begin{matrix}H\\H\end{matrix} + NH_4Cl \rightleftharpoons (CAS)\begin{matrix}NH_4\\H\end{matrix} + HCl.$$

L'ammonium absorbé est aisément assimilé par les plantes. En même temps, sa mobilité dans le sol et le danger d'être entraîné par les eaux dans les conditions d'un excès d'humidité et sur les

terres inondées se trouvent réduits. Les engrais aux sels d'ammonium peuvent servir de fumure de fond avant les semis.

L'absorption de l'ammonium par le sol et sa moindre mobilité peuvent aussi avoir une influence négative. L'azote de l'ammonium se localise dans le sol aux endroits où il a été apporté et se déplace très peu, c'est pourquoi quand on épand les engrais aux sels d'ammonium en fumure d'appoint et au moment des semis ou des plantations, les jeunes plantes dont le système radiculaire est peu développé ont du mal à assimiler cet azote ; de plus, l'arrivée intense d'azote d'ammonium dans les jeunes pousses de certaines cultures peut exercer sur elles une influence néfaste par intoxication due à l'excès d'ammoniac.

Sur lignes ou en fumure d'appoint, il vaut mieux donner des engrais nitriques, les engrais aux sels d'ammonium sont utilisés de préférence en fumure de fond avant les semis. Avec le temps, la différence de mobilité entre les engrais nitriques et ceux aux sels d'ammonium se nivelle, car l'azote de l'ammonium subit peu à peu une nitrification et passe à la forme de nitrate.

Le chlorure d'ammonium se nitrifie plus lentement que le sulfate d'ammonium ce qui est, sans doute, causé par l'action négative du chlore sur l'activité des bactéries nitrifiantes.

La nitrification des engrais aux sels d'ammonium provoque la formation de HNO_3, tandis que H_2SO_4 ou HCl est libéré. Ces acides acidifient la solution du sol et repoussent les bases du complexe absorbant. L'emploi systématique d'engrais aux sels d'ammonium, surtout sur les sols mal tamponnés, peu cultivés, élève l'acidité réelle, d'échange et hydrolytique, abaisse le degré de saturation du sol par les bases, augmente la teneur en formes d'aluminium et de manganèse mobiles. Il en résulte de plus mauvaises conditions de croissance pour les plantes et l'efficacité des engrais baisse. La nécessité d'un chaulage se fait plus pressante.

Ce sont surtout les cultures sensibles à l'acidité du sol, trèfle, blé, orge, betterave, chou qui réagissent le plus fortement à l'action acidifiante des engrais aux sels d'ammonium. Pour ces cultures, dès les premières années de leur emploi, ces engrais se montrent moins efficaces que les nitrates. Le chaulage des sols acides supprime l'action néfaste des engrais aux sels d'ammonium sur les propriétés du sol. Une bonne fumure au fumier augmente le pouvoir tampon du sol et fait baisser l'action indésirable de ces engrais sur les propriétés du sol. Elle rend donc leur emploi plus efficace.

L efficacité du sulfate d'ammonium et du chlorure d'ammonium apportés aux cultures de céréales, de betterave sucrière, de racines fourragères est à peu près identique. Pour les cultures sensibles au chlore (pomme de terre, tabac, lin, chanvre, cotonnier, sarrasin, agrumes, la plupart des légumes et des fruits) le chlorure d'ammonium, renfermant 66,6 % de chlore n'est pas à recommander. Un excès de chlore fait baisser leur rendement et, plus souvent encore, leur qualité.

C'est surtout sur les sols acides légers que l'action néfaste du chlore se manifeste le plus. On peut fortement la réduire si l'on apporte le chlorure d'ammonium plus tôt, en fumure de fond, de façon que le chlore soit entraîné dans les couches inférieures du sol; cependant, dans les régions humides, surtout sur les sols légers, des pertes partielles d'azote sont alors possibles.

Engrais azotés liquides. L'*ammoniac liquide* NH_3 renferme 82,3 % d'azote. On l'obtient par liquéfaction sous pression de l'ammoniac gazeux. Par son aspect, c'est un liquide incolore, mouvant, de densité 0,61 à 20 °C, de température d'ébullition 34 °C. Conservé en récipients ouverts, NH_3 se volatilise rapidement. Les vapeurs de l'ammoniac liquide sont d'une grande élasticité (5,2 kgf/cm^2 à 10 °C et 14 kgf/cm^2 à 38 °C), c'est pourquoi on le conserve et on le transporte dans des ballons d'acier ou des citernes résistant à une forte pression.

Les *ammoniacates* sont une solution de nitrate d'ammoniac ou un mélange de nitrate d'ammoniac avec du nitrate de calcium ou de l'urée en ammoniac liquide. Suivant leur composition, ils renferment de 30 à 45 % d'azote. C'est un liquide jaune clair qu'on peut conserver ou transporter dans des citernes ou des ballons prévus pour une pression faible. Les ammoniacates corrodent les métaux ferrugineux, c'est pourquoi l'équipement pour leur stockage doit être en acier spécial ou en aluminium.

L'*eau ammoniacale* NH_4OH est une solution aqueuse d'ammoniac à 25 ou 20 %, on la livre de deux qualités, avec des taux d'azote de 20,5 et 18 %. C'est un liquide incolore ou jaunâtre d'une forte odeur ammoniacale. L'élasticité des vapeurs n'est pas forte. On peut conserver et transporter l'eau ammoniacale dans des réservoirs hermétiquement fermés (citernes, bacs) prévus pour une pression faible.

Il est beaucoup meilleur marché de fabriquer et d'utiliser des engrais azotés liquides que des engrais solides. La fabrication d'engrais azotés liquides n'exige pas la construction d'ateliers pour la production de l'acide nitrique, pour la cristallisation, la concentration par évaporisation, la granulation, le desséchage, ce qui permet de réduire considérablement les investissements pour la construction d'une usine d'engrais azotés de capacité équivalente (en azote). Le prix d'une unité d'azote sous forme d'ammoniac liquide ou aqueux est environ 1,5-2 fois moins élevé que celui du nitrate d'ammoniac. De plus, de larges expériences de production ont montré que les dépenses de travail pour l'épandage d'engrais liquides sont 2 ou 3 fois moins élevées, car il n'est pas nécessaire d'accomplir un grand nombre de travaux de préparation à l'épandage (fractionnement, tamisage, versement dans les épandeurs) et que toutes les opérations nécessaires à leur emploi (chargement, déchargement, épandage) sont entièrement mécanisées. Correctement utilisés, les engrais azotés liquides donnent les mêmes gains de rendement des cultures qu'une dose égale d'azote dans le nitrate d'ammoniac.

Fig. 6. Epandeur pour l'apport d'engrais liquides

Tous les engrais azotés liquides sont épandus par des mécanismes spéciaux (fig. 6) permettant de les enfouir immédiatement à une profondeur d'au moins 10-12 cm sur les terres lourdes et de 14 à 18 cm sur les sols légers. Il est inadmissible d'apporter ces engrais en couverture, car l'ammoniac se volatilise rapidement. Un enfouissage moins profond entraîne aussi une perte considérable, surtout sur les sols légers, sables et limons sableux. Les pertes d'ammoniac sont beaucoup moins importantes à partir de la terre humide qu'à partir de la terre sèche.

Avec un apport d'engrais ammoniacaux liquides l'ion ammonium échangeable est absorbé (l'ammoniac anhydre se transforme en gaz et est fixé par l'humidité du sol avec formation d'un hydroxyde d'ammonium), c'est pourquoi il circule faiblement dans le sol. Dans les premiers jours qui suivent l'épandage, le sol s'alcalinise un peu, ensuite, au fur et à mesure de la nitrification, sa réaction se dévie vers une légère acidité. La nitrification de l'azote des engrais augmente sa mobilité dans le sol.

Les engrais azotés liquides peuvent être utilisés comme fumure de fond, avant les semis, sous toutes les cultures et être apportés non seulement à l'occasion d'une façon culturale préparatoire au semis, mais bien plus tôt, au moment du labour. On peut aussi les employer comme fumure d'appoint des cultures sarclées. Dans ce cas, pour ne pas brûler les plantes, on enfouit ces engrais au milieu des interlignes ou à une distance des plantes d'au moins 10 à 12 cm.

Au cours de la manipulation des engrais azotés liquides on observera les règles de la technique de la sécurité, car les vapeurs d'ammoniac irritent les muqueuses de l'œil et des voies respiratoires, provoquent de la suffocation, de la toux. Quand on examine et répare les récipients ayant servi à ces engrais, des mesures de précaution sont nécessaires, car le mélange d'ammoniac et d'air est explosif.

Les engrais ammoniacaux-nitriques. Le *nitrate d'ammonium* NH_4NO_3, principal engrais azoté, renferme 34,5 à 35 % d'azote. On l'obtient en neutralisant l'acide nitrique par l'ammoniac:

$$NH_3 + HNO_3 = NH_4NO_3.$$

Le nitrate d'ammonium est vendu sous forme de cristaux blancs ou de granulés de 1 à 3 mm, de configuration diverse (sphérique, sous forme d'écailles ou de plaques). Non granulé, le nitrate d'ammonium cristallisé est d'une hygroscopicité élevée, il s'agglutine au stockage, c'est pourquoi on le conservera en emballage imperméable dans un local sec. Le nitrate granulé est moins hygroscopique, il ne s'agglutine pas autant et conserve une bonne dispersibilité, surtout si, au cours de sa fabrication, on lui incorpore de petites quantités d'hydrofuge pour le conditionnement.

Le nitrate d'ammonium est un engrais hautement concentré, facilement soluble. Il peut être employé sous n'importe quelle culture et sur tous les sols avant les semis sur lignes ou dans les poquets et comme fumure d'appoint.

Dans le nitrate d'ammonium, une moitié de l'azote est sous la forme nitrique; l'autre moitié, sous la forme ammoniacale. A partir de la solution de NH_4NO_3, les plantes absorbent plus rapidement le cation NH_4^+ que l'anion NO_3^-, c'est pourquoi le nitrate d'ammonium est un engrais physiologiquement acide, mais il acidifie le sol plus faiblement que le sulfate d'ammonium.

Dans l'interaction de NH_4NO_3 avec le complexe absorbant du sol, le cation NH_4^+ est absorbé par le sol, tandis que l'anion NO_3^- reste dans la solution et conserve une grande mobilité:

$$(CAS)\begin{matrix}Ca\\Ca\end{matrix} + 2NH_4NO_3 \rightleftharpoons (CAS)\begin{matrix}NH_4\\Ca\end{matrix}NH_4 + Ca(NO_3)_2;$$

$$(CAS)\begin{matrix}H\\Ca\end{matrix}H + NH_4NO_3 \rightleftharpoons (CAS)\begin{matrix}NH_4\\Ca\end{matrix}H + HNO_3.$$

Sur les sols saturés en bases, il se forme dans la solution des nitrates de calcium ou de magnésium et la solution du sol ne s'acidifie pas, même si l'on apporte systématiquement de fortes doses d'engrais. Pour ces sols, le nitrate d'ammoniac est une des meilleures formes d'engrais azotés.

Sur les sols acides renfermant à l'état absorbé peu de calcium et beaucoup d'ions H^+, de l'acide nitrique HNO_3 se forme dans

la solution du sol, c'est pourquoi elle s'acidifie. Cette légère acidification est passagère et disparaît à mesure que les plantes consomment l'azote. Mais, les premiers temps, surtout si l'on apporte une forte dose de nitrate et qu'on la disperse irrégulièrement, il peut se former dans le sol des microsites d'acidité élevée.

Si le nitrate d'ammonium est longtemps employé sur des sols mal tamponnés, l'acidification peut être assez forte et l'efficacité de cet engrais diminue nettement, surtout s'il est apporté à des cultures sensibles à une forte acidité.

Sur les sols acides, un plus grand effet, surtout en apport systématique, est produit par le nitrate d'ammonium neutralisé ou calcaire, $NH_4NO_3 + CaCO_3$. Il renferme 18 à 23 % d'azote et s'obtient par fusion ou mélange de nitrate d'ammonium avec une quantité équivalente de chaux, de craie ou de dolomie. La neutralisation par dolomie est particulièrement utile pour les sables et limons sableux pauvres en magnésie.

L'urée (carbamide)

L'*urée* (carbamide) $CO(NH_2)_2$ renferme 45-46 % d'azote. Elle est obtenue par synthèse à partir de l'ammoniac et du dioxyde de carbone sous haute pression et à température élevée. C'est un produit blanc finement cristallisé, bien soluble dans l'eau. Jusqu'à la température de 20 °C, son hygroscopicité est relativement faible. Dans de bonnes conditions de stockage, elle s'agglutine peu et conserve une dispersabilité satisfaisante. L'urée granulée possède de bonnes propriétés physiques.

Au cours de la granulation de l'urée, il se forme du biuret toxique, mais son taux dans l'engrais ne dépasse pas 1 % et il est pratiquement inoffensif pour les plantes dans les conditions ordinaires d'utilisation.

Sous l'influence des urobactéries du sol excrétant l'enzyme uréase, l'urée s'ammonifie rapidement (en 2-3 jours) en formant du carbonate d'ammonium,

$$CO(NH_2)_2 + 2H_2O = (NH_4)_2CO_3.$$

Dans les premiers jours qui suivent l'apport de l'urée, en raison de la formation de $(NH_4)_2CO_3$ (sel hydrolytiquement alcalin), une alcalinisation légère et passagère du sol a lieu localement. L'ammonium formé est absorbé par le sol et se nitrifie peu à peu, sa nitrification étant beaucoup plus rapide que celle de $(NH_4)_2SO_4$ et surtout de NH_4Cl. Par cette nitrification, l'alcalinisation du sol est remplacée par une légère acidification.

Sur les sols légers mal tamponnés, les déviations de réaction de la solution du sol peuvent être assez prononcés, mais après que les plantes ont consommé l'azote, il ne reste dans le sol ni radicaux basiques, ni radicaux acides.

L'urée est un des meilleurs engrais azotés et elle ne le cède en rien au nitrate d'ammonium.

On peut l'utiliser comme engrais principal ou comme fumure d'appoint sous toutes les cultures et sur des sols différents. Quand on apporte l'urée au sol, il faut l'enfouir à temps, car, en couverture, il peut y avoir des pertes d'azote par volatilisation de l'ammoniac du carbonate d'ammonium, surtout sur les sols alcalins et riches en carbonates. De fortes pertes sous forme d'ammoniac peuvent se produire quand l'urée est employée comme fumure d'appoint sur les prés et les pâturages, car le gazon a une grande activité uréasique. L'urée est employée avec avantage pour l'alimentation foliaire des cultures potagères et fruitières, ainsi que pour les fumures d'appoint avancées du blé visant à augmenter la teneur du grain en protéines. En outre, l'urée est utilisée en grandes quantités dans l'élevage comme complément azoté aux fourrages composés surtout de glucides.

Afin de réduire les pertes d'azote par les engrais et d'augmenter leur efficacité, on met au point une technologie de production de formes d'engrais azotés d'action ralentie, peu solubles (mélange d'urée et de formaldéhyde) ou à libération lente de l'azote (enrobage synthétique). Pour conserver dans le sol l'azote de l'urée et des engrais ammoniacaux, les granulés sont recouverts de soufre ou bien l'on introduit dans la composition des engrais des inhibiteurs de la nitrification.

LES ENGRAIS PHOSPHATÉS

Le rôle du phosphore et sa teneur dans le sol

Le phosphore est un important élément de l'alimentation des plantes, qui le consomment principalement sous la forme de sels de l'acide orthophosphorique (H_3PO_4), mais elles peuvent également assimiler les sels des acides méta et pyrophosphoriques.

Dans les plantes, les ions $H_2PO_4^-$ et HPO_4^{2-} forment divers composés organiques. Le phosphore entre dans les acides nucléiques et les nucléoprotéides participant à la structure du cytoplasme et du noyau des cellules. Il se trouve aussi dans la phytine, substance de réserve de la graine utilisée comme source de phosphore pendant la germination, ainsi que dans les phosphates-sucres, les vitamines et beaucoup d'enzymes.

Il y a également dans les tissus des plantes de petites quantités de phosphates non organiques jouant un rôle important dans la création du système tampon du suc cellulaire et servant de réserve de phosphore pour la formation de différents composés organophosphoriques.

Dans la cellule végétale, le *phosphore joue un rôle extrêmement important dans l'échange énergétique* et participe à différents proces-

sus du métabolisme, de la division, de la mutiplication. C'est surtout dans le métabolisme des glucides, dans les processus de la photosynthèse, de la respiration, de la fermentation que le rôle joué par cet élément est de première importance.

Les transformations les plus variées des glucides dans la plante commencent par la fixation d'acide phosphorique aux molécules de glucides ou par son élimination, c'est-à-dire par leur phosphorylation ou déphosphorylation. Un rôle particulièrement important revient ici à l'acide adénosinetriphosphorique (ATP) et à d'autres composés phosphorés riches en énergie.

Le rôle important du phosphore dans le métabolisme des glucides explique l'influence bénéfique des engrais phosphatés sur l'accumulation du sucre dans la betterave sucrière, d'amidon dans les tubercules de la pomme de terre, etc.

Le phosphore joue également un grand rôle dans le métabolisme des substances azotées dans les plantes. La réduction des nitrates jusqu'à l'ammoniac, la formation d'acides aminés, leur désamination et transamination se font avec l'intervention du phosphore. C'est ce qui détermine un lien étroit entre l'alimentation azotée des plantes et leur alimentation phosphorée. En l'insuffisance de phosphore, la synthèse des protéines est perturbée, leur teneur dans les plantes diminue.

Ce sont les organes reproducteurs des plantes et leurs jeunes organes et parties en pleine croissance qui renferment le plus de phosphore. Dans ces organes, la synthèse de la matière organique se fait avec le plus d'intensité. Le phosphore peut se déplacer des vieilles feuilles vers les zones de croissance et être réutilisé, c'est pourquoi les signes extérieurs de son insuffisance apparaissent avant tout sur les vieilles feuilles. Elles prennent alors une nuance rouge violacé ou bleuâtre caractéristique et deviennent parfois d'un vert plus foncé. En déficience de phosphore, la croissance des plantes est ralentie, leur maturation retardée, la récolte baisse et sa qualité est plus mauvaise.

C'est dans leur très jeune âge lorsque leur système radiculaire est très faible que les plantes sont le plus sensibles à l'insuffisance de phosphore. A cette période, une carence en phosphore a des conséquences néfastes qui ne peuvent être réparées par une alimentation abondante dans la suite. C'est pourquoi il est si important de donner aux plantes suffisamment de phosphore dès le début de la végétation.

L'apport de petites quantités d'engrais phosphatés aisément assimilables sur les lignes (en poquets) au moment des semis et des plantations exerce un effet très favorable sur la croissance, le développement des plantes, ainsi que sur la formation de la récolte. Une abondante alimentation phosphorée accélère la formation des organes reproducteurs et la maturation des plantes, augmente les récoltes et améliore leur qualité.

La *teneur des différents sols en phosphore* (P_2O_5) varie de 0,03 à 0,2 %. La réserve totale de phosphore est plus grande dans les

sols renfermant beaucoup de matière organique (humus) : en moyenne de 1500 à 6000 kg par hectare dans la couche arable, mais sa masse essentielle se présente sous la forme de composés minéraux et organiques inaccessibles aux plantes.

Dans les roches-mères, le phosphore se trouve le plus souvent sous la forme de fluorapatite $Ca_5F(PO_4)_3$ et hydroxylapatite $Ca_5OH(PO_4)_3$. La destruction de ces minéraux phosphorés primaires libère des composés minéraux secondaires du phosphore représentés par différents sels d'acide orthophosphorique. Outre l'apatite, les sols contiennent encore d'autres composés minéraux du phosphore. Dans les sols acides (podzols engazonnés et terres rouges) il se forme des phosphates de sesquioxydes $AlPO_4$ et $FePO_4$, ainsi que des sels basiques de fer et d'aluminium $Fe_2(OH)_3PO_4$, $Al_2(OH)_3PO_4$ que caractérisent de très faibles solubilité et assimilabilité. Dans les sols saturés de bases (chernozems et terres grises), il se forme principalement des phosphates bi et trisubstitués de calcium $CaHPO_4$ et $Ca_3(PO_4)_2$. Ils sont faiblement solubles dans l'eau, mais sont peu à peu dissous par les acides carbonique, nitrique et organique de la solution du sol et deviennent donc plus accessibles aux plantes que les apatites et les phosphates des sesquioxydes. Dans tous les sols il y a en petites quantités des phosphates monosubstitués de calcium et de magnésium hydrosolubles, ainsi que des phosphates mono et bisubstitués de potassium, de sodium, d'ammonium. Ils sont rapidement utilisés par les plantes et les micro-organismes et se transforment en phosphates insolubles en interagissant avec Ca, Mg, Al et Fe.

L'activité des plantes et des micro-organismes a pour résultat également l'accumulation dans le sol de composés organiques du phosphore. Ce sont des nucléoprotéines, la phytine, les phosphatides, les phosphates-sucres et autres composés organiques entrant dans la composition des plantes et des micro-organismes. Le taux des phosphates organiques varie de 10 % dans les terres pauvres en humus à 50 % du P_2O_5 total dans les chernozems. Les plantes ne peuvent assimiler les phosphates organiques qu'après leur minéralisation et l'élimination de l'acide phosphorique.

Les composés minéraux et organiques inassimilables du phosphore ne passent que très lentement à des formes accessibles. Malgré les grandes réserves de phosphore, ses composés assimilables ne se trouvent ordinairement dans le sol qu'en quantités infimes et, pour obtenir de bonnes récoltes, l'apport d'engrais phosphatés est indispensable.

Durant la période de végétation, les plantes prélèvent du sol de 20 à 60 kg de P_2O_5 par hectare. Le grain est riche en phosphore, il y en a beaucoup moins dans la paille, c'est pourquoi une bonne partie du phosphore assimilé par les plantes quitte l'exploitation avec la production marchande. Aussi, pour renouveler les réserves de phosphore dans le sol un apport d'engrais phosphatés est-il nécessaire. D'où l'importance des engrais phosphatés pour l'obtention

de bonnes récoltes. Le besoin d'engrais phosphatés augmente surtout quand les plantes reçoivent suffisamment d'azote.

D'après leur solubilité et assimilabilité, les engrais phosphatés se subdivisent en trois groupes:

Les *engrais facilement dissous dans l'eau*, superphosphate simple et binaire.

Les *engrais peu solubles dans l'eau*, mais solubles dans des acides faibles (solution à 2 % d'acide citrique, citrate d'ammonium), précipité, scories de déphosphoration, thermophosphates, phosphate défluoré.

Les *engrais insolubles dans l'eau* et ne se dissolvant entièrement que dans des acides forts, farine de phosphorites, farine d'os.

La teneur des engrais en élément fertilisant est exprimée en pentoxyde de phosphore (P_2O_5).

On trouve les engrais phosphorés dans les gisements naturels riches en phosphore (phosphorites et apatites) ainsi que dans les déchets de l'industrie métallurgique (scories de déphosphoration).

Les engrais phosphatés s'obtiennent par traitement acide et thermique des phosphates. Parmi les engrais phosphatés fabriqués en U.R.S.S., la plus grande part revient au superphosphate. La production de superphosphate binaire ne cesse d'augmenter. La fabrication de produits du traitement hydrothermique des phosphates prend toujours plus d'ampleur.

Le superphosphate

Le *superphosphate simple* est obtenu en traitant de l'apatite ou de la phosphorite moulue par l'acide sulfurique dilué. Quand l'acide sulfurique agit sur le minerai phosphaté, l'apatite ou la phosphorite se décompose en formant un phosphate de calcium monosubstitué hydrosoluble $Ca(H_2PO_4)_2$ et du gypse $CaSO_4$, insoluble dans l'eau:

$$2Ca_5F(PO_4)_3 + 7H_2SO_4 + 3H_2O = 3Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O + 7CaSO_4 + 2HF;$$

$$Ca_3(PO_4)_2 + 2H_2SO_3 + H_2O = Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O + 2CaSO_4.$$

Le gypse fait presque la moitié de la masse de l'engrais (40 %). Dans un tel superphosphate il y a environ deux fois moins de phosphore que dans le minerai naturel. En U.R.S.S., on utilise surtout pour sa production un concentré d'apatite et des phosphorites à pourcentage élevé.

Le superphosphate simple renferme 19 à 20 % de P_2O_5. La majeure partie du phosphore s'y trouve sous forme de monophosphate de calcium, 5 à 5,5 % de la masse de l'engrais est sous la forme d'acide phosphorique libre. Le superphosphate contient en petite quantité du phosphate bicalcique $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$, ainsi que du phosphate tricalcique et des phosphates de fer et d'aluminium. Le superphosphate est apprécié d'après la teneur en phosphore assimi-

lable, c'est-à-dire soluble dans l'eau et la solution de citrate (solution ammoniacale de citrate d'ammonium).

Le superphosphate renferme 88-98 % de phosphore assimilable.

Le superphosphate est livré en granulés de 2 à 4 mm de grosseur. Ses qualités physiques sont satisfaisantes: il ne s'agglutine pas, conserve une bonne dispersibilité. Au cours de la granulation, l'acide phosphorique libre est neutralisé et le superphosphate séché; la teneur en eau et en acide phosphorique libre est donc respectivement de 1-4 % et de 1-1,5 %. Le taux de P_2O_5 est d'environ 20 %.

En neutralisant à l'ammoniac l'acidité libre du superphosphate on obtient un superphosphate ammonifié à environ 1,5 % d'azote.

Le *superphosphate binaire* renferme, à la différence du simple, un taux élevé de P_2O_5 (42-49 %) et ne contient pas de gypse. Le phosphore s'y trouve sous la forme de monophosphate de calcium hydrosoluble $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ et d'acide sulfurique libre (4,5-5,7 %).

Pour produire le superphosphate binaire, l'apatite (ou la phosphorite) est traitée à l'acide sulfurique. On en prend davantage que pour la production de superphosphate simple afin d'obtenir, non du monosulfate de calcium, mais de l'acide sulfurique au moyen duquel on traite ensuite une nouvelle portion de minerai pour obtenir un superphosphate binaire $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$:

$$2Ca_5F(PO_4)_3 + 10H_2SO_4 = 6H_3PO_4 + 10CaSO_4 + 2HF;$$

$$2CaF(PO_4)_3 + 14H_3PO_4 + 10H_2O = 10Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O + 2HF.$$

Le superphosphate binaire est livré en granulés. En tant qu'engrais hautement concentré et facile à transporter, sa production a de l'importance pour les régions éloignées des usines productrices d'engrais.

Les propriétés physiques et chimiques, l'emploi et l'efficacité du superphosphate binaire sont les mêmes que pour le simple. Il est à noter seulement que pour la fumure des plantes réagissant bien au gypse (trèfle et autres légumineuses) le superphosphate simple exerce un effet plus fort.

Dans le sol, le superphosphate entre en réaction chimique avec les sesquioxydes, les carbonates de calcium et de magnésium (ou le calcium absorbé) et se transforme en phosphates insolubles dans l'eau, moins bien assimilables, c'est-à-dire qu'ils subissent une absorption chimique, une rétrogradation. Dans les sols saturés de bases, chernozems et surtout sols riches en carbonates, se forment des phosphates bi et trisubstitués de calcium. Dans les sols acides, les terres rouges et autres sols latéritiques, renfermant une grande quantité de formes mobiles de sesquioxydes de Fe et Al, il se forme des phosphates d'aluminium et de fer peu assimilables. Plus le sol renferme de sesquioxydes mobiles, plus forte est l'absorption chimique de l'acide phosphorique du superphosphate. Le résultat en est une baisse de l'utilisation du phosphore par les plantes, ce qui diminue son efficacité.

Le phosphore du superphosphate se fixe presque entièrement à l'endroit où il est apporté et circule très peu dans le sol. Donné comme fumure de fond, le superphosphate doit être enfoui au labour, afin que l'engrais se trouve dans une couche plus profonde et constamment humide du sol où s'étale la masse essentielle des racines actives des plantes.

Dans les zones humides, on peut apporter le superphosphate en fumure d'appoint au moment de la cultivation des interlignes ou au moyen de cultivateurs spéciaux pour l'alimentation des plantes. En conditions d'aridité, si le superphosphate est apporté superficiellement, la masse principale de l'engrais se trouve dans la couche supérieure vite desséchée du sol. Dans cette couche, les racines meurent, raison pour laquelle le phosphore de l'engrais est moins bien utilisé par les plantes. Son apport superficiel en fumure d'appoint sans enfouissage est peu efficace.

Le sol fixe davantage le superphosphate quand l'engrais est en contact plus intime avec la terre (épandage par dispersion, particules de fines dimensions) que lorsqu'il est apporté localement, en tas.

Le superphosphate, surtout granulé, est moins bien fixé par le sol quand il est épandu localement sur les lignes ou dans les poquets au semis, ainsi qu'en bandes comme fumure de base.

Les méthodes d'épandage de l'engrais étant les mêmes (soit dispersé avant les semis, soit posé localement en lignes ou sur les poquets) l'efficacité du superphosphate granulé est beaucoup plus élevée que celle du superphosphate pulvérisé, surtout sur sols acides. Ceci s'explique par une plus faible fixation chimique du phosphore, la superficie de contact de l'engrais avec le sol étant moins grande.

Les expériences montrent qu'apportées localement de petites doses de superphosphate fournissent les mêmes accroissements de récolte que de fortes doses dispersées.

On épand en lignes, au moment des semis de céréales et de légumineuses à grains, 0,5 à 0,75 q/ha de superphosphate simple; dans les poquets lors des plantations des plantes-racines et à tubercules, ainsi que des cultures potagères, 0,75 à 1 q/ha: au semis du maïs, 0,2-0,4 q/ha ou deux fois moins de superphosphate double.

Quand le superphosphate est épandu dispersé avant les semis et enfoui au labour, le coefficient d'utilisation du phosphore est de 15 à 25 % de la quantité apportée, tandis qu'apporté localement, il augmente de 50 à 100 %.

Afin d'obtenir une bonne récolte, il est nécessaire de combiner l'apport de superphosphate par fumure de fond avant les semis à une petite dose épandue au moment du semis sur les lignes ou dans les poquets. De bonnes conditions d'alimentation des plantes en phosphore sont alors créées, aussi bien dans la première période de croissance aux dépens de la fumure sur lignes que dans les périodes suivantes aux dépens de la fumure de fond apportée au moment du travail profond de la terre.

Précipité, scories de déphosphoration, thermophosphates, phosphate défluoré

Sous la forme de $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$, phosphate de calcium bisubstitué, le *précipité* renferme de 35 à 41 % de P_2O_5. Il est obtenu par traitement acide des phosphates au moment de la précipitation de l'acide phosphorique par du lait de chaux ou de la craie, ainsi que comme déchet de la production de la gélatine.

Le phosphore du précipité est insoluble dans l'eau, mais il se dissout dans le citrate d'ammonium et est facilement assimilé par les plantes. L'engrais possède de bonnes propriétés physiques: il ne s'agglutine pas, reste dispersable, peut être mélangé à n'importe quel autre engrais. Il peut s'utiliser comme fumure de base sous différentes cultures et sur tous les sols. Il se fixe moins dans le sol que le superphosphate, c'est pourquoi il est plus efficace, tant sur les sols acides riches en sesquioxydes que sur les terres carbonatées. Sur les chernozems, le précipité est presque aussi efficace que le superphosphate.

Les *scories de déphosphoration* sont un produit secondaire de la transformation en fer et en acier des fontes riches en phosphore d'après la méthode alcaline de Thomas. Au moment de la fusion de la fonte, on ajoute à la charge de la chaux vive CaO qui fixe l'anhydride phosphorique P_2O_5 formé lors de l'oxydation du phosphore avec formation d'un sel calcique de l'acide phosphorique. Avec le silicate de calcium et d'autres impuretés, ce sel remonte à la surface du métal sous forme de scories qui, une fois refroidies, sont broyées en fine farine.

Les scories de déphosphoration sont une poudre fine et lourde de couleur foncée. Elles renferment de 14 à 20 % de P_2O_5. Le phosphore s'y trouve principalement sous la forme de phosphate tétracalcique $Ca_4P_2O_9$, ainsi que sous forme d'un sel double de phosphate tétracalcique et de silicate de calcium $Ca_4P_2O_9 \cdot CaSiO_3$. Ces composés sont solubles dans l'acide citrique à 2 % et leur phosphore est assimilable pour les plantes.

Les scories de déphosphoration peuvent être utilisées comme fumure de base sur tous les sols. Elles sont aussi efficaces que le superphosphate mais produisent plus d'effet que lui sur les sols acides, car elles renferment de l'oxyde de calcium libre et du phosphate tétracalcique qui abaissent l'acidité du sol. Les scories de déphosphoration ne devront pas être mélangées à des engrais aux sels d'ammonium.

On utilise aussi comme engrais les scories des fours Martin qui sont un déchet de la fusion de l'acier à partir de minerais contenant du phosphore. Elles renferment de 10 à 15 % de P_2O_5. Elles sont à peu près aussi efficaces que les scories de déphosphoration obtenues par le procédé Thomas.

Les *thermophosphates* sont obtenus par fusion ou par agglomération d'un phosphate ou d'une apatite moulu avec des sels basiques,

soude ou potasse, ou des silicates de calcium naturels, ainsi qu'avec des sulfates de potassium et de sodium. Il se forme alors des phosphates de calcium et de sodium, ou de calcium et de potassium $CaNaPO_4 + Ca_2SiO_4$ ou $CaKPO_4 + Ca_2SiO_4$ assimilables pour les plantes.

Les thermophosphates renferment de 18 à 34 % de P_2O_5. Ils se rapprochent des scories de déphosphoration par leurs propriétés et leur efficacité. Ils peuvent être utilisés comme fumure de base sur tous les sols, mais, en tant qu'engrais alcalins, ils sont plus efficaces sur les sols acides.

La fusion de phosphorite ou d'apatite avec les silicates de magnésium produit des *phosphates magnésiens fondus*. Ils renferment environ 20 % de P_2O_5 assimilable et 6 à 12 % de MgO et sont surtout efficaces sur les sables légers et les limons sableux pauvres en magnésium. On ne mélangera pas les thermophosphates avec les engrais ammoniacaux.

Le *phosphate défluoré* est obtenu à partir de l'apatite par traitement à la vapeur d'un mélange d'apatite avec une petite quantité de sable à la température de 1400-1500 °C. Le réseau cristallin de la fluorapatite se trouve alors détruit et le fluor s'échappe, tandis que le phosphore passe à une forme assimilable (soluble dans l'acide citrique).

Dans le phosphate défluoré, la teneur totale en P_2O_5 est de 30 à 36 %, dont 28 à 32 % de P_2O_5 soluble dans l'acide citrique. Cet engrais n'est pas hygroscopique et ne s'agglutine pas.

De même que les scories de déphosphoration et les thermophosphates, le phosphate défluoré ne sera pas mélangé aux engrais ammoniacaux. Il peut être employé comme fumure de base sur tous les sols, ne le cédant en rien par l'efficacité au superphosphate.

La farine de phosphorites

Elle est obtenue par broyage de la phosphorite jusqu'à l'obtention d'une farine fine. Le phosphore s'y trouve à l'état de composés du type apatite-fluorapatite, d'hydroxylapatite, de carbonate d'apatite et sous la forme du phosphate de calcium trisubstitué $Ca_3(PO_4)_2$. Ces composés ne sont solubles ni dans l'eau, ni dans les acides faibles et ne sont guère accessibles à la plupart des plantes.

La farine de phosphorites n'est pas hygroscopique, elle ne s'agglutine pas et peut être mélangée à n'importe quel engrais excepté la chaux. En U.R.S.S., l'industrie des engrais livre quatre qualités de farine de phosphorites dont la teneur totale en P_2O_5 est : pour la qualité supérieure, 30 % ; la première qualité, 25 % ; la 2e qualité, 22 % ; la 3e, 19 %.

Pour la fabrication de la farine de phosphorites on peut utiliser des phosphorites à bas pourcentage, inutilisables pour la transformation chimique en superphosphates.

La farine de phosphorites est l'engrais phosphoré le moins cher.

L'efficacité de cet engrais dépend de la composition des phosphorites, de la finesse de la mouture, des particularités des plantes, des propriétés du sol et des autres engrais employés. Les phosphorites en nodules d'âge géologique plus jeune qui ne possèdent pas une structure cristalline bien prononcée sont plus accessibles pour les plantes. Leur mouture donne une farine qu'on peut utiliser immédiatement comme engrais. Les phosphorites d'origine plus ancienne à structure cristalline sont moins accessibles et ne conviennent pas à la préparation de farine de phosphorites.

Plus la mouture est fine et plus la farine de phosphorite est efficace, car la superficie de contact des particules avec le sol est plus grande et la farine de phosphorites se dégrade mieux jusqu'à des composés assimilables sous l'action de l'acidité du sol.

L'importance de la finesse de la mouture pour l'efficacité de la farine de phosphorites est surtout grande sur les sols insuffisamment acides pour pouvoir la décomposer, par exemple, les chernozems podzolés ou lessivés.

Peu de plantes (lupins, moutarde, sarrasin et, en partie, pois et chanvre) peuvent assimiler le phosphore de la farine de phosphorites en réaction neutre de la solution du sol, c'est-à-dire sans décomposition préalable sous l'action de l'acidité du sol. Des recherches ont montré que les plantes capables d'assimiler la phosphorite ont, dans leur cendre, un rapport $CaO : P_2O_5$ supérieur à 1,3 et que les plantes incapables de l'assimiler ont un rapport inférieur à 1,3. Une plus grande consommation de calcium que de phosphore par les plantes décalcifie le milieu nourricier, ce qui facilite le passage de $Ca_3(PO_4)_2$ à une forme assimilable. Le laboratoire de D. Prianichnikov avait montré que les excrétions racinaires acides du lupin acidifient fortement le sol, ce qui décompose le phosphate.

La plupart des plantes ne peuvent assimiler la phosphorite qu'à une certaine acidité du sol, suffisante pour sa décomposition, c'est pourquoi, sur les sols de réaction neutre, l'emploi de farine de phosphorites est inopérant, tandis que sur les sols acides, donnée en double dose, elle ne le cède en rien au superphosphate (tableau 27).

Ce n'est pas seulement l'acidité réelle, mais aussi potentielle qui participe à la décomposition de la farine de phosphorites. Sous l'influence de l'acidité du sol, la farine de phosphorites se transforme en sulfate de calcium bisubstitué $CaHPO_4$ assimilable pour les plantes. Les recherches ont montré que sur les sols dont l'acidité hydrolytique est inférieure à 2-2,5 mEq pour 100 g, la farine de phosphorites se décompose faiblement et son efficacité est très basse. Plus l'acidité hydrolytique est forte, plus l'efficacité de la farine de phosphorites est élevée. Cependant, son action dépend non seulement de la valeur de l'acidité du sol, mais aussi de la capacité d'échange (T) et du degré de saturation par les bases (V).

Pour la même acidité hydrolytique, l'action de la farine de phosphorites est d'autant plus forte que la capacité d'échange du sol est plus basse (fig. 7).

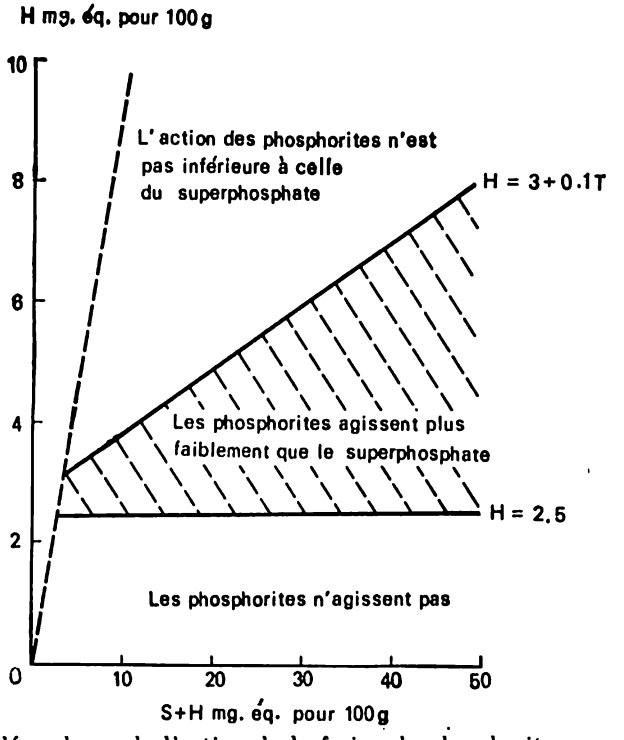


Fig. 7. Schéma de la dépendance de l'action de la farine de phosphorites par rapport à l'acidité hydrolytique (*H*) et la capacité d'échange totale (*T*) du sol

La dose de farine de phosphorites est également établie d'après l'acidité du sol. Sur les sols fortement et moyennement acides

Tableau 27

Influence du superphosphate et de la farine de phosphorites sur le rendement en grain du seigle suivant les sols (données de 1086 expériences au champ)

Sols	Gain en grain			
	avec du superphosphate (45 kg de P_2O_5/ha)		avec de la farine de phosphorites (90 kg de P_2O_5/ha)	
	q/ha	%	q/ha	%
podzoliques	3,5	38	3,1	33
gris forestiers	2,6	23	2,1	19
Chernozems:				
dégradés	3,7	28	3,3	24
lessivés puissants	4,1	25	2,6	16
ordinaires	3,6	24	1,3	8

(pH 5,0 et moins) on peut apporter la farine de phosphorites à la même dose que le superphosphate, mais sur les sols faiblement acides on épandra une dose double ou même triple.

La farine de phosphorites est utilisée comme fumure de fond, il vaut mieux l'apporter d'avance et obligatoirement avec un labour profond à la charrue. Son action bénéfique dure plusieurs années. Plus la dose apportée est grande et plus la durée de son action est prolongée.

Les engrais accompagnant la farine de phosphorites contribuent pour beaucoup à augmenter son efficacité qui s'élève notablement si on l'épand en même temps que du fumier et, particulièrement, si l'on en fait des composts avec du fumier ou de la tourbe acide. Un bon effet est obtenu en fumure de base sous le labour, associée à une petite dose de superphosphate granulé sur les lignes ou dans les poquets au moment du semis.

LES ENGRAIS POTASSIQUES

L'importance du potassium pour les plantes et sa teneur dans le sol

Le potassium est, à côté de l'azote et du phosphore, un des éléments essentiels de l'alimentation minérale. A la différence de l'azote et du phosphore, il n'entre pas dans la composition des substances organiques de la plante, mais se trouve sous une forme ionique dans les cellules végétales sous l'aspect de sels solubles du suc cellulaire et en partie sous l'aspect de complexes d'adsorption instables avec les colloïdes du cytoplasme.

Il y a beaucoup plus de potassium dans les parties vitales et organes jeunes de la plante que dans les vieux. La déficience de potassium dans le milieu nourricier entraîne sa sortie des organes et tissus plus vieux dans les jeunes organes en croissance où il est réutilisé.

Les **fonctions physiologiques du potassium** dans l'organisme végétal sont très variées. Il exerce une influence positive sur l'état physique des colloïdes du cytoplasme, augmente leur hydratation, leur gonflement, leur viscosité, ce qui est important pour le métabolisme normal des cellules, ainsi que pour faire augmenter la résistance des plantes à la sécheresse. En pénurie de potassium, si la transpiration est forte, les plantes perdent leur turgescence et flétrissent.

Le potassium agit positivement sur l'intensité de la photosynthèse, des oxydations, sur la formation des acides organiques dans la plante, il participe au métabolisme des glucides et de l'azote. En déficience de potassium, la synthèse des protéines dans la plante se ralentit et tout le métabolisme de l'azote se trouve perturbé.

L'insuffisance de potassium se fait surtout sentir quand les plantes sont alimentées en azote de l'ammonium. En pénurie de

potassium, l'apport de fortes doses d'azote d'ammonium entraîne l'accumulation dans les plantes d'une grande quantité d'ammoniac non transformé dont l'influence est nuisible. Grâce aux engrais potassiques, l'azote ammoniacal est plus rapidement utilisé pour la synthèse des acides aminés et son influence nuisible est supprimée.

En pénurie de potassium, la transformation des glucides simples (monoses) en plus compliqués (oligo et polysaccharides) est retardée.

Le potassium augmente l'activité des enzymes participant au métabolisme des glucides, entre autres, de la saccharase et de l'amylase. C'est ce qui explique l'action positive des engrais potassiques sur l'emmagasinage de l'amidon dans les tubercules de la pomme de terre, du sucre dans la betterave sucrière et autres plantes-racines.

Sous l'influence du potassium, les plantes sont plus résistantes au gel car elles renferment davantage de sucre et la pression osmotique dans leurs cellules s'élève.

Lorsque l'alimentation en potassium est suffisante, les plantes résistent mieux à certaines maladies, par exemple, les céréales à la rouille et à l'oïdium ; les légumes, la pomme de terre et les plantes-racines, aux germes des pourritures. Le potassium favorise le développement des éléments mécaniques, des faisceaux vasculaires, des fibres du liber, c'est pourquoi il exerce une action profitable sur la solidité des tiges et la résistance des plantes à la verse, sur le rendement et la qualité de la fibre du lin et du chanvre.

La pénurie de potassium réprime le développement des organes reproducteurs, celui des boutons et des ébauches florales, le grain est grêle, son pouvoir germinatif diminué.

Chez les plantes, ces signes de la carence en potassium se manifestent nettement quand leur teneur en potassium est de 3 à 5 fois inférieure à la normale.

Il y a ordinairement toujours plus de potassium dans les organes végétatifs que dans les graines, les racines, les tubercules. La teneur relative en potassium des feuilles de tournesol, de tabac, de betterave sucrière et d'autres plantes-racines, de pomme de terre est de 4 à 6 % de la masse sèche, dans la paille des céréales de 1-1,5 %, des plantes textiles de 0,5-1 %, du chou jusqu'à 0,5 %. Le grain des céréales renferme environ 0,5 % de potassium, les tubercules de pomme de terre, les plantes-racines 0,3-0,6 % (v. tableau 6).

Quand le rendement est grand, les plantes prélèvent sur le sol une forte quantité de potassium : les céréales environ 60 à 80 kg de K_2O par hectare ; la pomme de terre, la betterave sucrière, les cultures maraîchères jusqu'à 150-250 kg par hectare. De tous les éléments minéraux, c'est le potassium que les plantes utilisent en plus grande quantité. Le tournesol, la pomme de terre, la betterave, le chou et autres légumes consomment la plus grande quantité de potassium. Les céréales en prélèvent moins.

Dans les différents sols, la **teneur en potassium** (K_2O) varie de 0,5 à 3 % et dépend de leur composition mécanique. C'est la fraction argileuse qui en renferme le plus. Aussi les terres argileuses lourdes

et les limons argileux sont-ils plus riches en potassium que les sols sableux et les limons sableux. Les sols tourbeux sont très pauvres en potassium (0,03-0,05 %). La plupart des sols cultivés renferment environ 2 % de potassium, soit beaucoup plus que d'azote et de phosphore.

Dans la couche arable, la réserve totale de K_2O est de 50 à 75 t/ha, mais sa partie principale (98-99 %) se trouve sous la forme de composés insolubles et peu accessibles aux plantes. D'après le degré de mobilité et d'assimilabilité pour les plantes, les composés potassiques renfermés dans le sol peuvent être classés dans les principales formes suivantes.

1. Le potassium entrant dans la composition des minéraux alumino-silicatés solides, principalement des feldspaths (orthoclase) et des micas (mica argenté, muscovite, biotite).

Le potassium des feldspaths est peu accessible aux plantes. Cependant, sous l'influence de l'eau et de l'acide carbonique dissous qu'elle renferme, des variations de température du milieu et de l'activité des micro-organismes du sol, ces minéraux se décomposent progressivement avec formation de sels de potassium solubles. Le potassium de la muscovite et de la biotite est plus facilement assimilable pour les plantes.

2. Le potassium échangeable absorbé par les colloïdes du sol ne représente pas plus de 0,8-1,5 % de la teneur totale du sol en potassium. C'est à lui que revient le rôle essentiel dans l'alimentation des plantes. La bonne assimilabilité du potassium échangeable pour les plantes est déterminée par la facilité avec laquelle il passe, au cours de son échange avec d'autres cations, dans la solution d'où il est absorbé par les plantes. Au fur et à mesure que les plantes assimilent le potassium de la solution, de nouvelles portions de cet élément passent du complexe absorbant dans la solution du sol. A mesure que le potassium échangeable est absorbé, ce processus se ralentit et le potassium restant est retenu de plus en plus solidement à l'état absorbé.

La teneur en potassium échangeable peut servir d'indice du degré d'approvisionnement du sol en potassium assimilable. Les sols lourds par leur composition mécanique sont plus riches en potassium échangeable que les sables et les limons sableux.

3. Le potassium hydrosoluble est représenté par différents sels dissous dans l'eau du sol (nitrates, phosphates, sulfates, chlorures, carbonates de potassium) directement assimilés par les plantes. Son taux dans le sol est ordinairement insignifiant (environ 1/10 du potassium échangeable), étant donné que, de la solution, le potassium passe immédiatement à l'état absorbé et est consommé par les plantes.

Dans certains sols, le potassium hydrosoluble (ainsi que le potassium des engrais apportés) peut être absorbé sous sa forme non échangeable, ce qui fait considérablement baisser son assimilabilité. La fixation non échangeable du potassium, de même que

de l'ion ammonium, s'exprime le plus fortement dans des alternances d'humidification et de dessèchement des sols.

Dans les cultures céréalières, la paille renferme davantage de potassium que le grain; les plantes-racines et à tubercules en contiennent davantage dans les fanes que dans les tubercules et les racines. C'est pourquoi, une utilisation plus complète des résidus végétaux comme fourrage et comme litière pour le bétail ramène au sol une grande partie du potassium avec le fumier. Un emploi rationnel du fumier importe beaucoup pour l'alimentation des plantes en potassium.

Pour obtenir de bonnes récoltes, surtout de cultures consommant beaucoup de potassium, un rôle important revient, à côté des engrais azotés et phosphatés, aux engrais potassiques minéraux. C'est surtout sur les sols légers et tourbeux pauvres en potassium que leur apport est efficace. Les engrais potassiques sont fabriqués à partir des gisements naturels de sels potassiques. La teneur des engrais en potassium est calculée en K_2O (%).

Dans l'assortiment des engrais potassiques fabriqués en U.R.S.S. prédominent les formes hautement concentrées, le chlorure de potassium (près de 80 % de la production globale d'engrais potassiques en 1980) et la sylvinite à 40 % (14 %). La production de sulfate de potassium a été réduite. On fabrique en outre des engrais potassiques renfermant du magnésium, concentré mixte de potasse-magnésie, patentkali, chlorure de potassium électrolyte. Une partie relativement faible des engrais potassiques est fabriquée sous forme d'engrais complexes. On utilise aussi en agriculture comme engrais potassiques des sels naturels de potassium, de la poudre de ciment et des queues de néphéline.

Sels potassiques naturels et déchets industriels

Les sels **potassiques naturels** obtenus par broyage des sels potassiques des gisements sont caractérisés par une faible teneur en potassium et une grande quantité d'impuretés, ce qui élève considérablement les frais de transport et d'épandage. C'est pourquoi il est avantageux de ne se servir des sels potassiques qu'à proximité des gisements. Les sels potassiques naturels les plus répandus sont la sylvinite et la caïnite. Elles renferment une grande quantité de chlore (plus de 4 kg de chlore dans la sylvinite pour 1 kg de K_2O), ce qui limite également leur emploi. Le tabac, les agrumes, la vigne, le lin, le chanvre, le sarrasin, la pomme de terre sont particulièrement sensibles à un excès de chlore.

La **sylvinite** $nKCl + m\ NaCl$ renferme 12 à 15 % de K_2O et 35 à 40 % de Na_2O. Son aspect offre un mélange de cristaux blancs, roses, bruns et bleus. Peu hygroscopique, mais prend l'humidité en local frais et s'agglutine au séchage.

Il est utile d'employer la sylvinite en fumure de base et de l'épandre d'avance au labour sur les sols lourds. De cette façon,

une bonne partie du chlore est entraînée par l'eau dans les couches profondes et le potassium est absorbé par le sol.

La teneur assez forte de la sylvinite en sodium (2,5 kg de Na_2O pour 1 kg de K_2O) est utile à la betterave, aux plantes-racines fourragères et potagères, à certains légumes.

La **caïnite** $KCl \cdot MgSO_4 \cdot 3\ H_2O$ contient une quantité importante de NaCl; contient 10 à 12 % de K_2O, environ 8 % de MgO, près de 40 % de chlore et 35 % de Na_2O. Elle est obtenue par le broyage des roches de caïnite ou de caïnite-langbeinite. Comme la sylvinite, elle est employée en fumure de base. Grâce à la présence de $MgSO_4$ et de NaCl, l'apport de caïnite à la betterave sucrière et autres plantes-racines, au chou, au trèfle, donne de bons résultats, surtout sur les sols légers.

La **poudre de ciment** renferme de 14 à 35 % de K_2O sous forme de carbonates, de bicarbonates et de sulfate de potassium. Par son efficacité, épandue pour des cultures sensibles à un excès de chlore, elle ne le cède en rien au sulfate de potassium. Les propriétés physiques défavorables de la poudre de ciment (qui fait poussière et est très hygroscopique) peuvent être éliminées par granulation.

Les **queues de néphéline**, néphéline finement moulue, est un déchet de la production de concentré d'apatite. Elles renferment 5-6 % de K_2O et d'autres bases (10 à 13 % de Na_2O et 8 à 10 % de CaO). La faible teneur de la néphéline en potassium exclut son transport à de longues distances.

Les engrais potassiques industriels

Le **chlorure de potassium** KCl renfermant une petite quantité de NaCl contient de 58 à 62,5 % de K_2O. Il est obtenu à partir de la sylvinite par séparation de KCl et de NaCl grâce à la différence de solubilité de ces sels à mesure que la température s'élève. On obtient de cette façon du KCl sous la forme de fins cristaux. S'agglutine fortement au stockage. La granulation améliore beaucoup les qualités physiques de l'engrais.

D'autres procédés d'obtention du chlorure de potassium à partir de la sylvinite, par flottation ou cyclon hydraulique sont plus simples, moins onéreuses et, en même temps, ils permettent d'améliorer les propriétés physiques de l'engrais. Ils reposent sur la séparation de KCl et NaCl d'après leur densité. Le chlorure de potassium obtenu revêt la forme de gros cristaux (de 4 à 6 mm de dimension) qui ne s'agglutinent pas au stockage. Le chlorure de potassium est le principal engrais potassique. Il peut être utilisé pour toutes les cultures et sur tous les sols.

Les **sels potassiques à 40 %** sont obtenus en mélangeant mécaniquement du chlorure de potassium avec de la sylvinite finement moulue ou de la caïnite. Ils renferment davantage de chlore et de sodium que le chlorure de potassium. Les sels potassiques sont surtout efficaces pour la betterave sucrière et les plantes-racines

fourragères qui réagissent positivement au sodium et sont peu sensibles au chlore. Pour les cultures sensibles à un excès de chlore, ils conviennent moins bien que le chlorure de potassium. Les sels potassiques sont enfouis profondément à la charrue comme fumure de fond.

Le **sulfate de potassium** K_2SO_4 renfermant 45 à 48 % de K_2O. C'est un sel cristallin fin de couleur grise, soluble dans l'eau. Il est obtenu en extrayant K_2SO_4 des gisements naturels de sulfate de potassium. Sa fabrication exige une grande dépense d'énergie et revient cher.

Le sulfate de potassium a de bonnes propriétés physiques, il n'est pas hygroscopique, ne s'agglutine pas. Il peut être employé sur tous les sols et pour toutes les cultures, mais il convient particulièrement à celles qui sont sensibles au chlore (tabac, vigne, agrumes, etc.).

Le **patentkali**, sulfate double de potassium et de magnésium $K_2SO_4 \cdot MgSO_4$ contient 29 % de K_2O et 9 % de MgO. On l'obtient à partir de gisements naturels de sulfate de potassium par recristallisation. Le patentkali est une bonne fumure pour les plantes sensibles au chlore et consommant, outre du potassium, beaucoup de magnésium, surtout sur les sols sableux, les limons sableux pauvres en potassium et en magnésium.

Le **chlorure de potassium-électrolyte** est un déchet de la production de magnésium à partir de carnallite; il renferme de 32 à 45 % de K_2O et, en outre, 8 % de MgO, 8 % de Na_2O et jusqu'à 50 % de Cl. Il peut être utilisé sous toutes les cultures comme fumure de fond apportée d'avance.

Tous les engrais potassiques sont solubles dans l'eau. Epandus dans le sol, ils sont rapidement dissous et réagissent avec le complexe absorbant du sol:

$$(CAS)\begin{matrix}Ca\\Ca\end{matrix} + 2KCl \rightleftharpoons (CAS)\begin{matrix}K\\K\\Ca\end{matrix} + CaCl_2;$$

$$(CAS)\begin{matrix}H\\Al\end{matrix} + 4KCl \rightleftharpoons (CAS)\begin{matrix}K\\K\\K\\K\end{matrix} + AlCl_3 + HCl.$$

Le potassium et les autres cations (Na^+, Mg^{2+}) entrant dans la composition des engrais potassiques sont absorbés par la fraction colloïdale du sol, le chlore reste dans la solution d'où il est facilement entraîné par l'eau. Le potassium étant passé à l'état absorbé, sa mobilité dans le sol diminue et il n'est pas lessivé, sauf dans les sols sableux et les limons sableux dont la capacité d'échange est faible. Le potassium échangeable de l'engrais absorbé par le sol est facilement accessible aux plantes. Le coefficient d'utilisation du potassium à partir des engrais minéraux est de 60-70 %.

Sur les sols dont la composition mécanique est moyenne ou lourde, les engrais potassiques seront de préférence enfouis au labour.

De cette façon, l'engrais se déplace dans une couche du sol plus humide où se développent la plupart des racines actives et c'est pourquoi le potassium est plus complètement assimilé par les plantes.

Sur les sols légers, surtout dans les régions où les précipitations atmosphériques sont abondantes, il vaudra mieux apporter les engrais potassiques immédiatement avant le semis ou en fumure d'appoint enfouie dans le sol.

Tous les engrais potassiques sont des sels physiologiquement acides, mais leur acidité physiologique est inférieure à celle des engrais ammoniacaux et elle ne se manifeste qu'au bout d'une utilisation prolongée sous des cultures consommant beaucoup de potassium. Absorbés par le sol, les cations Na^+ et K^+ contenus dans les engrais potassiques en repoussent une quantité équivalente de cations Ca^{2+} ou H^+ et Al^{3+} (sur les sols acides). L'élimination des ions H^+ et Al^{3+} du sol conduit à l'acidification de la solution du sol et à l'augmentation de sa teneur en aluminium.

Une acidification plus forte n'est observée que si l'on apporte systématiquement de fortes doses d'engrais potassiques à des sols non saturés en bases.

Les résultats d'expériences multiples attestent que si l'on emploie à bon escient les engrais potassiques, chaque kilogramme de K_2O assure en moyenne le gain suivant de production marchande (en kg/ha): betterave sucrière 35-40; pomme de terre 20-33; céréales 2-3; foin de trèfle ou de luzerne 20-30. Sur les sols légers ou tourbeux, le gain assuré par unité de potassium est encore plus grand.

La cendre, engrais local potassique, phosphaté et calcique

La cendre résultant de la combustion du bois ou de la paille renferme du potassium, du phosphore, du calcium, des oligo-éléments. C'est un engrais potassique, phosphoré et calcique précieux (tableau 28).

Tableau 28

Teneur (en %) de la cendre en potassium, phosphore, calcium

Nature de la cendre	K_2O	P_2O_5	CaO
Cendre de feuillus	10,0	3,5	30,0
Cendre de conifères	6,0	2,5	35,0
Cendre de paille de seigle	16,2	4,7	8,5
Cendre de paille de sarrasin	35,3	2,5	18,5
Cendre de tournesol	36,3	2,5	18,5
Cendre de fumier, bouses séchées	11,0	5,0	9,0
Cendre de tourbe	1,0	1,2	20,0
Cendre de houille	2,0	1,0	—

Dans la cendre, le potassium se trouve sous forme de carbonate K_2CO_3 bien soluble dans l'eau. Cette forme de potassium est celle qui convient le mieux à toutes les cultures particulièrement sensibles au chlore. C'est la cendre de tournesol et de paille de céréales qui est le plus riche en potassium. La cendre de bois renferme moins de potassium, mais beaucoup plus de calcium que la cendre de paille. La cendre de tourbe renferme peu de phosphore et de potassium, elle est surtout utilisée comme engrais calcique. La cendre de houille est pratiquement sans importance comme source de potassium pour les plantes.

La cendre devra être conservée en local sec car l'eau entraîne ses éléments fertilisants (surtout le potassium) et sa valeur comme engrais diminue.

Elle peut être utilisée sur tous les sols et pour toutes les cultures. Comme engrais renfermant de la chaux son effet est surtout bon sur les sols acides, principalement sur les sols sableux, les limons sableux et les tourbières pauvres en potassium.

La cendre peut être apportée en fumure de fond (avant le labour sur les terres lourdes et avant le semis sur les sols légers), ainsi que comme fumure d'appoint sous les plantes sarclées (au moment de la cultivation des interlignes).

LES ENGRAIS COMPLEXES

La diversité de fertilité des sols et les particularités d'alimentation des différentes cultures rendent nécessaire non seulement l'emploi séparé de l'azote, du phosphore et du potassium sous la forme des engrais simples correspondants, mais de deux ou trois éléments fertilisants dans un rapport déterminé, ainsi que d'oligoéléments. Dans ces conditions, l'emploi d'engrais mélangés et complexes assure une grande économie de travail et d'argent.

Les **engrais complexes** renferment deux ou trois éléments fertilisants. S'ils contiennent deux éléments dans un même composé chimique, ils sont binaires; s'ils en renferment trois, ils sont ternaires. Ce sont, par exemple, l'ammo et diammophos, les métaphosphates de calcium, de potassium ou d'ammonium, des polyphosphates d'ammonium et de potassium, des carboammophos.

Les engrais complexes comprennent aussi les engrais combinés obtenus par un même processus technologique et renfermant dans les granulés les principaux éléments nutritifs des plantes. Ils sont produits par un traitement spécial d'engrais simples ou binaires ou d'une manière première initiale. Ce sont les nitrophoskas, les nitroammophoskas, les engrais pressés phosphatés potassiques, les engrais granulés complexes et de mélange, les engrais complexes liquides. Ce qui les caractérise, c'est une haute concentration des principaux éléments fertilisants et l'absence ou une quantité négligeable de lest.

L'assortiment principal des engrais complexes en U.R.S.S.

comprend l'ammo et diammophos, le nitroammophos, le nitroammophoska, le nitrophoska, les engrais phosphatés potassiques complexes (tableau 29).

Tableau 29

Principaux engrais complexes fabriqués en U.R.S.S.

Engrais	Rapport des éléments fertilisants ($N : P_2O_5 : K_2O$)	Teneur totale en éléments fertilisants (%)
Ammophos	1 : 4 : 0	56-63
Diammophos	1 : 2,5 : 0	66-68
Nitroammophoska	1 : 1 : 1	48-51
Nitrophoska	1 : 1 : 1	33-35
Nitroammophos	1 : 1 : 0	48
Phosphatés potassiques	0 : 1 : 1	50

On met au point actuellement la fabrication de métaphosphates de potassium et d'ammonium, de polyphosphates d'ammonium, d'urée-ammophos et d'autres engrais complexes hautement concentrés.

La concentration plus élevée et l'association de plusieurs éléments fertilisants dans les engrais permet de réduire le volume des livraisons d'engrais, les frais de transport, de stockage et d'épandage.

L'*ammophos* $NH_4H_2PO_4$ et le *diammophos* $(NH_4)_2HPO_4$ sont obtenus en neutralisant l'acide phosphorique par l'ammoniac. Ces engrais sont peu hygroscopiques.

L'ammophos renferme 11 à 12 % de N et 36 à 49 % de P_2O_5, c'est-à-dire que dans cet engrais le rapport $N : P_2O_5$ est extrêmement grand et égale presque 1 : 4. Le diammophos renferme 19-21 % de N et 49-53 % de P_2O_5, le rapport $N : P_2O_5$ est égal à 1 : 2,5. Ce sont des engrais hautement concentrés renfermant de l'azote et du phosphore et bien assimilés par les plantes, principalement sous leur forme hydrosoluble.

Ces engrais peuvent être apportés comme fumure de fond ou fumure d'appoint. Comme ils renferment de 2,5 à 4 fois moins d'azote que de phosphore, il convient de les épandre avec d'autres engrais azotés.

Les *nitrophos* et les *nitrophoskas* sont obtenus par décomposition de l'apatite ou de la phosphorite par l'acide nitrique avec formation de phosphate bicalcique et de nitrate de calcium :

$$Ca_3(PO_4)_2 + 2HNO_3 = Ca(NO_3)_2 + 2CaHPO_4.$$

$Ca(NO_3)_2$ étant très hygroscopique, ce mélange a de mauvaises propriétés physiques. Pour améliorer celles-ci, l'excès de calcium est éliminé de la solution, à fin de quoi on fait passer le nitrate de calcium dans d'autres composés. On y parvient de diverses façons.

On ajoute au mélange de l'ammoniac et de l'acide sulfurique ou du sulfate d'ammonium (schéma sulfate) avec formation de nitrate d'ammonium et de gypse, ou bien l'on ajoute de l'ammoniac et de l'acide carbonique qui est meilleur marché (schéma carbonate). Dans le premier cas, l'engrais se compose de phosphate bicalcique, de phosphate d'ammonium et de gypse ; dans le second, de phosphate bicalcique, de nitrate d'ammonium et de carbonate de calcium. On a également recours à la réfrigération du nitrate de calcium suivie du traitement du mélange par l'ammoniac et l'acide sulfurique. L'engrais obtenu se compose de nitrate d'ammonium, de phosphate bicalcique. Ces engrais sont appelés nitrophos. L'addition de KCl aux nitrophos donnent des engrais ternaires appelés nitrophoskas. Il se forme alors des sels (NH_4Cl et KNO_3) moins hygroscopiques que le nitrate d'ammonium.

Dans les nitrophoskas, l'azote et le potassium sont sous des formes facilement dissoutes (NH_4NO_3, NH_4Cl, KNO_3, KCl), tandis que le phosphore prend principalement la forme insoluble dans l'eau, mais accessible aux plantes, du phosphate bicalcique et accessoirement celle du phosphate d'ammonium hydrosoluble. Suivant le schéma technologique adopté, les taux de phosphore hydrosoluble et de phosphore soluble dans le citrate peuvent varier.

Dans les nitrophoskas la teneur globale en éléments fertilisants peut varier : N de 10 à 17 %, P_2O_5 de 8 à 30 % et K_2O de 12 à 20 %.

Les nitrophoskas sont livrés en granulés de 2,5-4 mm ou de 1,65-2,8 mm.

Les nitrophoskas sont épandus comme fumure de base avant les semis et ceux qui renferment une bonne partie de leur phosphore sous une forme hydrosoluble sont également apportés au semis sur les lignes ou dans les poquets. Pratiquement, leur efficacité est la même que celle de quantités équivalentes d'un mélange d'engrais simples.

Les nitrophoskas ont un rapport déterminé entre l'azote, le phosphore et le potassium ; or, comme les sols se distinguent entre eux d'après leurs teneurs en différents éléments nutritifs et que les besoins que les plantes en ont varient aussi, quand on fume au moyen de nitrophoskas (comme au moyen d'autres engrais complexes) il arrive souvent qu'on soit forcé d'apporter des correctifs, c'est-à-dire d'épandre en surplus sous forme d'engrais simples tel ou tel élément fertilisant insuffisant.

Les *nitroammophos* (nitroammophos et diammonitrophos) sont obtenus en neutralisant à l'ammoniac un mélange d'acide nitrique et phosphorique. Le produit final se distingue par un taux élevé d'éléments fertilisants et l'on peut faire varier largement, dans leur composition, le rapport entre N et P. Les nitroammophos peuvent être livrés avec un taux d'azote dans l'intervalle de 10 % à 30 % et de P_2O_5 dans l'intervalle de 27 % à 14 %.

L'addition de chlorure de potassium fournit des engrais combinés ternaires, des nitroammophoskas ayant en tout de 44 à 62 % d'élé-

ments nutritifs. Ces éléments, le phosphore du nombre, se trouvent sous une forme hydrosoluble assimilable pour les plantes.

Les *carboammophos*. Leur fabrication repose sur la propriété qu'a l'urée de former des composés complexes avec l'acide phosphorique ou avec l'ammo et le diammophos. Les engrais contiennent 24 à 48 % d'azote et 48 à 18 % de P_2O_5. Pour obtenir un engrais combiné ternaire on ajoute du chlorure de potassium. La somme globale des éléments fertilisants dans les carboammophoskas atteint 60 %.

Les *polyphosphates d'ammonium* sont obtenus en neutralisant l'acide polyphosphorique par l'ammoniac. L'acide polyphosphorique ou superphosphorique est un mélange d'acides ortho-pyrophosphoriques proprement dits et renferme environ 75 % de P_2O_5. Le polyphosphate d'ammonium renferme 17 % d'azote, 60 % de P_2O_5. Sur la base de l'acide superphosphorique peuvent être produits d'autres engrais complexes hautement concentrés solides (le polyphosphate de potassium renfermant, par exemple, 57 % de P_2O_5 et 37 % de K_2O) ou liquides (composés de 10 % de N, 34 % de P_2O_5, etc.).

Les **engrais complexes liquides** sont obtenus en neutralisant les acides ortho et polyphosphoriques par l'ammoniac et en ajoutant des solutions renfermant de l'azote (urée, nitrate d'ammonium) et du chlorure de potassium. Par leur efficacité, les engrais complexes liquides ne le cèdent en rien au mélange d'engrais solides simples et aux engrais solides complexes type nitroammophoska. Pour employer les engrais complexes liquides il faut tout un équipement spécial pour le transport, le stockage, l'épandage. On peut les employer de la même façon que les engrais solides : en couverture avant le labour et la cultivation, localement au semis et comme fumure d'appoint, dans le travail des interlignes des plantes sarclées ou superficiellement sur les cultures semées.

Les **mélanges d'engrais complexes granulés** sont fabriqués en mélangeant des engrais pulvérulents simples et complexes (superphosphates simple ou double, nitrate d'ammonium ou urée, chlorure de potassium) dans un granulateur à tambour en ajoutant de l'ammoniac afin de neutraliser l'acidité libre du superphosphate et de l'acide phosphorique, ou de l'ammophos et du diammophos pour enrichir le mélange en phosphore.

On peut ajouter à la composition des engrais complexes solides et liquides au cours de leur fabrication des oligo-éléments, ainsi que des désherbants et des pesticides.

MÉLANGES D'ENGRAIS

Les mélanges d'engrais sont obtenus en mélangeant deux ou trois engrais simples. De cette façon, on économise beaucoup de travail et de temps en comparaison de leur épandage séparément, les propriétés physiques des engrais sont améliorées car les engrais

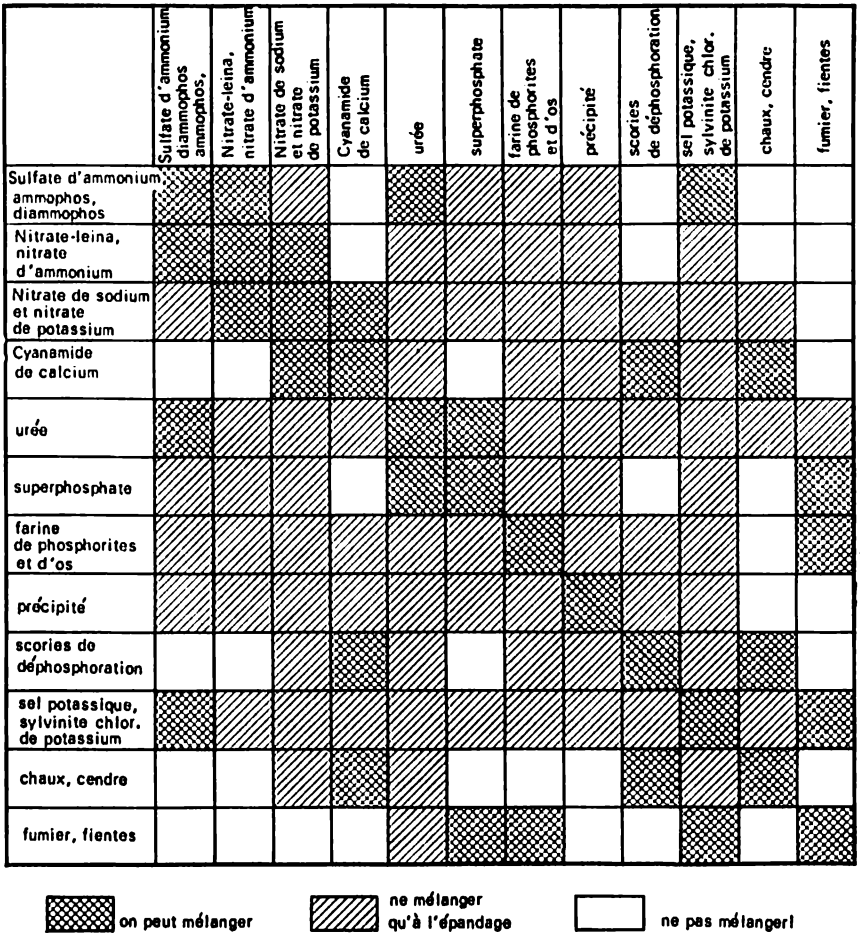


Fig. 8. Schéma du mélange des engrais

sont distribués plus régulièrement sur le champ et les éléments fertilisants se trouvent ensemble dans des foyers communs.

Les mélanges d'engrais varient en composition suivant les particularités de la culture fumée et les propriétés du sol. Cependant, on ne peut mélanger n'importe quels engrais. Les réactions chimiques qui se produisent entre eux pourraient avoir des résultats regrettables: détérioration des propriétés physiques, baisse de la solubilité ou perte d'éléments fertilisants (fig. 8).

En mélangeant le superphosphate et la farine de phosphorites avec des engrais potassiques, de même que du nitrate d'ammoniac et du sulfate d'ammonium avec du précipité, de la farine de phosphorites et des engrais potassiques il ne se passe rien d'indésirable, même si l'on stocke ces mélanges pour une longue durée.

Quand on mélange les engrais ammoniacaux avec la chaux, la cendre, les scories de déphosphoration et les thermophosphates, il se produit une perte d'azote par volatilisation de l'ammoniac; d'autre part, le mélange de superphosphate avec de la chaux rend le phosphore insoluble. Ce sont donc des engrais à ne pas mélanger.

Le mélange de sulfate d'ammonium et de nitrate d'ammoniac avec du superphosphate durcit au stockage ou forme une masse tachante incommode pour la pulvérisation.

Afin d'améliorer les propriétés physiques du mélange, il est nécessaire d'ajouter aux engrais les plus courants: nitrate d'ammoniac, superphosphate, chlorure de potassium, une petite quantité (10 à 15 %) de neutralisants (calcaire ou dolomie broyé, farine de phosphorites, farine d'os). Le mélange reste alors dispersable, même si on le garde 4 ou 5 mois.

Avant l'épandage, l'urée peut être ajoutée à toutes les formes d'engrais phosphatés et potassiques, son mélange avec le superphosphate conserve de bonnes propriétés physiques, même employé d'avance en fumure de fond.

Les mélanges d'engrais acquièrent de bien meilleures propriétés physiques et restent dispersables quand les engrais sont granulés, surtout si les granulés sont de mêmes dimensions.

LES OLIGO-ÉLÉMENTS

Pour croître et se développer normalement, les plantes ont besoin, outre d'éléments majeurs, d'un grand nombre d'oligo-éléments. On utilise actuellement des engrais renfermant du bore, du manganèse, du cuivre, du zinc et du cobalt, du molybdène. Le rôle des oligo-éléments des engrais augmente avec l'usage intensif de macro-éléments et l'abondance des récoltes.

Le bore. Pour la formation de la récolte, les plantes consomment de 30 à 150 g de bore par hectare. Les céréales, seigle, blé, orge, avoine, sont moins sensibles à une insuffisance de bore. La betterave sucrière, les plantes-racines fourragères, le tournesol, la pomme de terre, le lin, le trèfle, la luzerne, la moutarde et certains légumes prélèvent beaucoup plus de bore et sont sensibles à sa déficience.

Le bore est nécessaire aux plantes pendant toute la durée de leur vie. Une insuffisance de bore dans le sol entraîne un arrêt de croissance et des maladies des plantes, une baisse du rendement et la détérioration de la qualité des produits.

Le bore ne peut circuler des vieux organes de la plante vers ses parties plus jeunes, c'est pourquoi sa déficience frappe surtout les jeunes organes en pleine croissance. Ce sont d'abord les points végétatifs des tiges, des jeunes pousses et des racines qui meurent. Avec la mort du sommet végétatif, d'abondants rejets latéraux se forment, mais leur croissance est aussi bientôt suspendue.

En pénurie de bore, la betterave est frappée du brunissement du cœur avec formation d'une cavité et parfois même destruction

totale de la racine; le lin est atteint d'une bactériose; la pomme de terre, de la gale. Ces maladies disparaissent entièrement avec un apport de bore aux plantes.

L'influence du bore sur le métabolisme des glucides et des protéines et sur certains processus biochimiques des plantes est fondamentale. Une carence en bore perturbe la circulation des sucres et de l'amidon des feuilles vers les autres organes. La photosynthèse s'en trouve perturbée, le système radiculaire n'étant pas pourvu en glucides voit son développement entravé; chez les légumineuses, le pouvoir fixateur de l'azote des nodosités s'affaiblit.

Le bore joue un rôle important dans le développement des organes reproducteurs. La pénurie de bore cause une diminution du nombre des fleurs, un trouble de la fécondation, la chute des embryons, la récolte de graines diminue nettement. L'apport d'engrais contenant du bore élève notablement la récolte des graines de trèfle et de luzerne, de lin, des cultures potagères et autres.

Dans les sols de types différents, la teneur totale en bore varie de 1,5 jusqu'à 50-60 mg par kilogramme de sol. Les composés hydrosolubles de bore constituent environ 3 à 10 % de sa quantité totale. Ce sont les sols salifères, surtout salins, ainsi que les terres grises qui sont le plus riche en bore. Les podzols engazonnés et les terres rouges en renferment beaucoup moins.

Un besoin net de nombreuses cultures en engrais renfermant du bore se fait sentir lorsque le sol contient moins de 0,1 mg de bore mobile par kilogramme.

Le besoin d'engrais au bore se manifeste surtout sur les sols marécageux foncés, les sols podzoliques saturés en bases. Un taux bas de bore, de même que d'autres oligoéléments est constaté dans les sols sableux et les limons sableux.

Un apport de doses élevées d'engrais azotés, phosphatés et potassiques, la présence d'autres conditions favorables à la croissance des plantes font augmenter le besoin des cultures en engrais renfermant du bore.

Les engrais renfermant du bore hydrosoluble: *farine de borodatolite* (2 % de bore) et *engrais boromagnésiens* (1-1,3 % de bore) sont utilisés d'avance (au moment des cultivations) à raison de 0,5-1,5 kg de bore à l'hectare; une moitié au semis, puis en fumure d'appoint à raison de 200-300 g de bore à l'hectare.

Le *borate de magnésium précipité* renferme 1,5 % de bore assimilable mais non hydrosoluble; il est utilisé enfoui d'avance. Le *superphosphate boraté* simple ou double (respectivement 0,1-0,3 % et 0,1-0,5 % de bore) sera utilisé de préférence sur les lignes au semis et au moment des plantations. Le *borax*, sel de bore pur (11 % de bore) et l'*acide borique* (17 % de bore) sont utilisés en petites quantités, 100 à 200 g d'acide borique ou 200-300 g de borax pour le traitement préparatoire au semis d'un quintal de graines, ainsi que pour la fumure d'appoint par les feuilles.

L'apport d'engrais au bore sur les sols pauvres en cet élément

sous une forme assimilable fait que le rendement en racines de betterave sucrière s'accroît de 25 à 30 q/ha, celui du grain des légumineuses à grains : pois, vesce, féverole, de 2 à 4 q, celui des graines de trèfle et de luzerne de 0,5 à 1 q, des graines de cultures potagères de 30 à 50 %.

Les **engrais au manganèse.** La quantité de manganèse exportée avec la récolte de cultures diverses varie entre 100 et 500 g à l'hectare. L'importance physiologique du manganèse est liée au rôle qu'il joue dans les oxydo-réductions dans les cellules végétales, à l'activité des enzymes oxydases de l'oxydation. Quand le manganèse est en quantité insuffisante, l'intensité des oxydo-réductions diminue, ainsi que celle de la synthèse des substances organiques dans les plantes.

Le manganèse joue un grand rôle dans l'assimilation par les plantes de l'azote de l'ammoniac et des nitrates en agissant dans un cas comme oxydant et dans l'autre comme réducteur. L'insuffisance de manganèse perturbe la réduction de l'azote nitrique et les nitrates s'accumulent dans les tissus des plantes.

Les signes de la carence en manganèse se manifestent le plus souvent chez les plantes-racines et à tubercules, ainsi que chez les céréales. Le taux de la chlorophylle dans les feuilles baisse, elles présentent des taches de chlorose, l'intensité de la photosynthèse diminue, les céréales sont frappées de la moucheture grise, maladie carentielle qui s'exprime d'abord par l'apparition de taches grises sur les feuilles, puis de longues bandes parallèles aux veines du limbe, les feuilles brunissent et meurent.

C'est surtout sur les sols de réaction neutre ou alcaline, sables et limons sableux, tourbières, que la déficience de manganèse se fait le plus souvent sentir. Dans les sols acides, le taux de manganèse mobile (échangeable) est plus élevé, c'est pourquoi l'emploi d'engrais au manganèse sur ces terres peut avoir des conséquences néfastes, car un excès de cet élément est nuisible aux plantes. Après un chaulage des sols acides, l'apport d'engrais au manganèse peut devenir efficace.

Actuellement, en U.R.S.S., les engrais au manganèse sont largement employés pour la culture de la betterave sucrière, du maïs, de la pomme de terre et des plantes potagères ; ils assurent une importante élévation du rendement. Ainsi, en Ukraine, l'emploi des engrais au manganèse procure des gains de rendement de la betterave sucrière de 14 à 25 q/ha, un accroissement de la richesse en sucre des racines de 0,11-0,33 % ; pour le blé, un gain de 3,2-4,7 q/ha ; pour le chou, la pomme de terre et les concombres, de 40 à 50 q/ha.

On utilise comme engrais au manganèse le *sulfate de manganèse* renfermant environ 20 % de manganèse, du *superphosphate granulé manganésien* renfermant 2 à 3 % de manganèse et les déchets de l'industrie du raffinage du manganèse, les *boues manganésiennes* renfermant de 9 à 15 % de cet élément sous des formes peu solubles.

Les boues manganésiennes peuvent être apportées avant les semis sous labour (1,5-3 q/ha), ainsi que comme fumure d'appoint enfouie à raison de 0,5-1 q/ha. Le superphosphate manganésien est utilisé comme fumure sur les lignes au moment du semis. Le sulfate de manganèse est un sel soluble et il est utilisé pour un traitement préparatoire des graines au semis (par humectage ou saupoudrage) à raison de 50 à 100 g pour 1 q de graines et pour la fumure superficielle par les feuilles (solution à 0,05 % pour une dépense de 300 à 500 l par hectare).

Les **engrais au cuivre.** L'exportation du cuivre par les récoltes atteint des dizaines de grammes à l'hectare. Le cuivre entre dans la composition des enzymes oxydatrices et joue un rôle important dans les oxydations se déroulant dans la plante. Il a également un grand rôle dans le métabolisme des glucides et des protéines des plantes et dans la formation de la chlorophylle dans les feuilles.

En déficience de cuivre, on observe le jaunissement des feuilles provoqué par la destruction de la chlorophylle. Nous avons déjà vu (p. 30) que l'insuffisance de cuivre provoque une maladie spécifique, la peste blanche. Les plantes sont vert pâle, elles se mettent à taller fortement, la pointe des feuilles blanchit, le grain est grêle. En carence prononcée, les épis ne se forment pas, la tige finit par se dessécher.

Sont surtout pauvres en cuivre les tourbières des bas-fonds récemment mises en valeur et les terres marécageuses à réaction neutre ou alcaline. Pour obtenir de bonnes récoltes sur de tels sols, un apport d'engrais au cuivre est nécessaire. Sur des tourbières n'ayant pas reçu ces engrais, la récolte de céréales est infime, 2 à 3 q/ha, mais après l'apport de ceux-ci, le rendement s'élève à 20-25 q/ha.

Répondent également bien à un apport de cuivre les plantes textiles, la betterave sucrière, le tournesol, la moutarde, les pois, la fléole, tandis que les betteraves fourragère et potagère, le turneps, la carotte y sont moins sensibles. Les engrais au cuivre agissent positivement aussi sur la qualité des produits: la teneur du grain en protéine, celle des plantes-racines en sucre, des fruits et des légumes en vitamine C augmente. La pomme de terre, le chou, le seigle résistent mieux à une insuffisance de cuivre.

Les engrais au cuivre utilisés sont les déchets de l'industrie de l'acide sulfurique: *résidus des pyrites* renfermant de 0,3 à 0,6 % de cuivre, ainsi que le *sulfate de cuivre*, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ renfermant environ 25 % de cuivre. Les résidus des pyrites seront enfouis sous labour (5 à 7 q/ha) ou au moment de la cultivation, mais pas avant 10 à 15 jours avant les semis. Le sulfate de cuivre peut être utilisé comme fumure d'appoint superficielle par les feuilles ou comme traitement préparatoire des graines (humectage) au semis.

Pour la fumure d'appoint, on dissout 250 à 500 g de sulfate de cuivre dans 300 à 500 l d'eau. Sa dépense au cours du traitement préparatoire est de 50 à 100 g pour 1 q de semences.

Les engrais au molybdène. La teneur des engrais en molybdène est de millièmes ou dix-millièmes de pour cent en matière sèche. Il y en a davantage dans les graines, surtout les grains des légumineuses dont les nodosités en sont riches. Le molybdène joue un grand rôle dans la fixation de l'azote atmosphérique par les bactéries des nodosités et les bactéries libres fixatrices d'azote. En l'insuffisance de molybdène, les nodosités des racines se développent mal, les bactéries fixatrices d'azote ne peuvent fixer normalement l'azote moléculaire.

Un rôle majeur revient au molybdène dans le métabolisme de l'azote chez les plantes et dans la synthèse des protéines lorsqu'elles assimilent l'azote nitrique. En pénurie de molybdène un excès de nitrates s'accumule dans les tissus végétaux, leur réduction est retardée et la marche du métabolisme azoté est perturbée. Quand on donne aux plantes des engrais nitriques, leur besoin en molybdène est plus grand que lorsqu'on leur donne des engrais ammoniacaux. Les légumineuses, certaines crucifères et la betterave sucrière sont les plus sensibles à une déficience de molybdène; leur rendement augmente considérablement quand on leur apporte des engrais renfermant cet élément. La pénurie de molybdène provoque l'apparition de signes carentiels: les plantes souffrent d'une insuffisance d'azote, les feuilles pâlissent, la croissance des plantes est freinée (v. p. 29).

La teneur globale des sols en molybdène varie entre 0,2 et 10 mg par kilogramme. Il y a fort peu de molybdène échangeable dans les sols acides, car en réaction acide il se trouve sous une forme inaccessible aux plantes. Le chaulage des sols acides rend le molybdène du sol plus mobile, plus assimilable et fait que l'apport d'engrais au molybdène devient moins urgent ou absolument inutile.

Comme engrais renfermant du molybdène on utilise le *molybdate d'ammonium* renfermant 54 % de molybdène; le *molybdate d'ammonium-sodium* technique à 35 %: le *superphosphate au molybdène* renfermant 0,2 % de l'élément, des déchets industriels en contenant 0,3-4 %.

Les engrais au molybdène sont rarement enfouis d'avance, leur utilisation sur lignes au semis (sous la forme de superphosphate au molybdène) est plus avantageuse; pour la fumure d'appoint superficielle on s'en sert pour pulvériser les plantes (100 à 200 g de Mo par hectare) aux phases précoces de leur croissance. Le traitement préalable par une solution de sels de molybdène ou par un saupoudrage des graines avant le semis (25 à 50 g de Mo pour la norme de graines d'un hectare) produit aussi un effet satisfaisant. L'emploi du molybdène sous les légumineuses et les plantes potagères sur sols acides est le plus efficace. Sous l'influence du molybdène s'améliore aussi la qualité de la production: la teneur en protéine du grain et du foin des légumineuses augmente, ainsi que celle en vitamines et en sucre des plantes potagères.

En cas d'insuffisance dans les sols de formes assimilables de bore,

de manganèse, de cuivre et de molybdène et, dans certaines conditions, également de cobalt, d'iode, de vanadium et d'autres oligo-éléments les cultures agricoles donnent une récolte faible et de mauvaise qualité. L'emploi des oligo-éléments nécessaires augmente considérablement le rendement et améliore la qualité des récoltes. Les oligo-éléments font que beaucoup de plantes voient augmenter leur richesse en sucre, en amidon, en protéines, en vitamines et en lipides. La résistance des plantes à la sécheresse, aux températures basses et élevées, aux attaques des parasites et aux maladies augmente également. L'importance des oligo-éléments dépasse de beaucoup la sphère de la culture des plantes étant donné que leur déficience peut entraîner des maladies de l'homme et des animaux.

L'insuffisance de certains oligo-éléments dans le sol se manifeste par l'apparition de signes carentiels chez les plantes. Cependant, dans la pratique de l'agriculture on a plus souvent affaire à une déficience moins prononcée des oligo-éléments : on ne constate pas de signes carentiels nets, mais la croissance et le développement des plantes sont compromis. Le besoin en oligo-éléments peut être évalué d'après les résultats de l'analyse chimique des sols pour un dosage des formes accessibles aux plantes d'oligo-éléments qu'elles contiennent (tableau 30).

Tableau 30

Appréciation des sols selon leur teneur en oligo-éléments

Appréciation des sols	Teneur en oligo-éléments (mg par kg de sol)					
	B (dans l'extrait aqueux)	Cu (dans 1 n HCl)	Mn (dans 0,1 n H_2SO_4)	Mo (dans l'extrait aqueux)	Zn (dans 0,1 n KCl)	Co (dans 1 n HNO_3)
très pauvres	0,1	0,3	1	0,05	0,2	0,2
pauvres	0,1-0,2	0,3-1,5	1-10	0,05-0,15	0,2-1,0	0,2-1,0
moyens	0,3-0,5	2-3	20-50	0,20-0,25	2-3	1,5-3,0
riches	0,6-1,0	4-7	60-100	0,3-0,5	4-5	4-5
très riches	1	7	100	0,5	5	5

Les résultats d'expériences au champ permettent de juger avec plus de précision de la nécessité d'apporter des oligo-éléments dans les conditions pédoclimatiques concrètes.

Généralement, les engrais aux oligo-éléments sont plus efficaces si les plantes sont bien alimentées en éléments fertilisants majeurs : azote, phosphore, potassium. Cependant, l'apport des oligo-éléments nécessaires améliore notablement l'effet des engrais azotés, phosphatés et potassiques. Les oligo-éléments assurent une meilleure utilisation par les plantes des éléments nutritifs du sol et des engrais minéraux.

L'efficacité économique des oligo-éléments est très élevée quand ceux-ci manquent dans les sols sous une forme assimilable.

Actuellement, en URSS, les engrais à oligo-éléments sont épandus sur une superficie d'environ 5 millions d'hectares et l'aire de leur emploi s'élargit constamment.

CHAPITRE 5

LES ENGRAIS ORGANIQUES

Les engrais organiques comprennent le fumier, la tourbe, le purin, les fientes de volaille, les matières fécales, divers composts. Ils renferment de l'azote, du phosphore, du potassium, du calcium et autres éléments de l'alimentation des plantes, ainsi que de la matière organique qui améliore les propriétés physiques du sol, augmente son pouvoir absorbant et son pouvoir tampon et exerce une action bénéfique sur le développement des micro-organismes du sol.

En comparaison des engrais minéraux, la teneur des engrais organiques en azote, phosphore et potassium n'est pas élevée, c'est pourquoi on ne les transporte pas à des grandes distances. Ils sont utilisés sur place; ce sont donc des engrais locaux.

LE FUMIER

Le fumier est un engrais organique de première importance renfermant tous les éléments nutritifs nécessaires aux plantes. Aussi l'appelle-t-on un engrais complet.

Malgré la production toujours croissante d'engrais minéraux, le fumier reste aujourd'hui encore la source essentielle d'azote, de phosphore et de potassium, aussi bien par la quantité d'éléments nutritifs qu'il renferme que par la modicité de leur prix. L'académicien D. Prianichnikov soulignait au sujet de l'énorme importance du fumier: « Si grande que soit la production d'engrais minéraux dans un pays, le fumier restera toujours un des engrais essentiels. »

De nombreuses expériences et la pratique des exploitations montrent que l'augmentation du rendement des cultures, surtout sur les terres peu humifiées, dépend dans une grande mesure de la qualité et de la quantité du fumier utilisé, de son stockage correct et de sa bonne utilisation.

Tout en augmentant le rendement de la culture à laquelle il est apporté, le fumier possède un effet s'étendant sur plusieurs années, et améliore les récoltes des trois ou quatre cultures suivantes. Les expériences montrent que chaque tonne de fumier donne pour 4 ou 5 ans une augmentation totale du rendement calculée en grain d'un quintal.

La composition du fumier

Le fumier est constitué par les déjections solides et liquides des animaux et par leur litière (s'il y en a). Sa composition et sa valeur fertilisante dépendent de l'espèce du bétail, de l'affouragement, de la quantité et de la qualité de la litière, du procédé de stockage.

La quantité et les proportions des excrétions solides et liquides diffèrent beaucoup selon l'espèce animale. C'est ainsi que les chevaux fournissent 3,5 fois plus de matières solides que de liquides, les moutons et les bovins en fournissent 2,5 fois plus, tandis que les porcs rejettent 2 fois plus d'urines que d'excréments. Le fumier le plus sec est celui du cheval, il se réchauffe et se décompose plus rapidement.

Les déjections solides et liquides des animaux n'ont pas une valeur égale par leur composition et leurs éléments fertilisants. La plus grande partie du phosphore rejetée par les animaux est contenue dans les excréments, tandis que presque tout le potassium et de la moitié à deux tiers de l'azote se retrouvent dans l'urine. Dans la partie solide des déjections, l'azote et le phosphore entrent dans les composés organiques et passent, après minéralisation, à une forme accessible aux plantes. Dans les déjections liquides, les éléments nutritifs se présentent sous une forme dissoute assimilable.

Par sa qualité et sa quantité l'affouragement influe sur la composition et les proportions des déjections solides et liquides des animaux. Plus on leur donne de fourrage vert aqueux, plus il y a de déjections liquides. Plus l'alimentation du bétail est facile à digérer, moins les excréments renferment de matière sèche, tandis que les urines en contiennent davantage. Quand augmente la quantité des aliments concentrés, la teneur des excréments en azote et en phosphore s'élève également. En moyenne, environ 40 % de la matière organique, 50 % de l'azote, 80 % du phosphore et 95 % du potassium des aliments consommés par les animaux passent dans le fumier.

Le genre et la quantité de litière employée jouent un grand rôle pour l'augmentation de la production du fumier et l'amélioration de sa qualité. La litière améliore les propriétés physiques du fumier, absorbe l'urine et l'ammoniac formé par sa décomposition et réduit ainsi les pertes d'azote. C'est surtout la faculté qu'a la litière d'absorber les liquides et les gaz qui est particulièrement importante. Sa propre teneur en azote et en éléments minéraux influe aussi sur la qualité du fumier (tableau 31).

Pour la litière des animaux on se sert de paille de céréales, de tourbe, de miettes de tourbe, plus rarement de copeaux et de sciure. C'est la tourbe qui est la litière la plus précieuse ; elle contient 3 ou 4 fois plus d'azote que la paille et possède une capacité d'absorption importante : elle absorbe presque totalement l'urine et l'ammoniac formé par sa décomposition. C'est pourquoi le fumier sur litière de tourbe renferme davantage d'azote total et ammoniacal que le fumier sur litière de paille et son efficacité est plus grande, surtout sur un podzol engazonné.

Pour la litière, il vaut mieux utiliser la tourbe superficielle mousseuse faiblement décomposée d'une humidité de 30 à 40 % (tableau 32). Quand on utilise de la tourbe de fond à un degré de décomposition plus avancé, il faut en prendre deux fois plus et pour que les animaux ne se salissent pas, la recouvrir de paille.

Tableau 31

Composition du fumier frais (%) suivant l'espèce animale et la litière employée

Constituants du fumier	Litière de paille				Litière de tourbe	
	Bovins	Chevaux	Ovins	Porcins	Bovins	Chevaux
Eau	77,3	71,3	64,6	72,4	77,5	67,0
Matière organique	20,3	25,4	31,8	25,0	—	—
Azote total	0,45	0,58	0,83	0,45	0,60	0,80
Azote ammoniacal	0,14	0,19	—	0,20	0,18	0,28
Phosphore (P_2O_5)	0,23	0,28	0,23	0,19	0,22	0,25
Potassium (K_2O)	0,50	0,63	0,67	0,60	0,48	0,53
Calcium (CaO)	0,40	0,21	0,33	0,18	0,45	0,44

Tableau 32

Normes journalières moyennes de litière (kg) pour une tête de bétail tenue en étable

Espèce animale	Genre de litière	
	paille de céréales	tourbe mousseuse peu décomposée
Bovins	4-6	5-8
Chevaux	3-5	3-5
Ovins	0,5-1	1-1,5
Porcs engraissés	1-2	1,5-2

La paille utilisée comme litière a une longueur de 8 à 15 cm. Elle absorbe alors mieux l'urine, s'humecte plus régulièrement, le fumier obtenu est plus homogène, plus facile à tasser en blocs et il perd moins d'azote au stockage, on peut l'épandre plus uniformément sur le champ. Un fumier de ce genre perd près de 2 fois moins d'azote et son efficacité augmente de 50 % (tableau 33).

Non seulement la litière influe sur la qualité du fumier, elle en augmente encore le rendement. Quand on augmente de 2 à 6 kg la dose de la litière de paille, l'accumulation de fumier s'accroît de 30 à 40 % et les pertes d'azote sont réduites de 3 à 4 fois.

Les copeaux fins et la sciure de bois utilisés comme litière fournissent un fumier de mauvaise qualité. Il renferme peu d'azote et se décompose lentement.

Tableau 33

Influence de la coupe de la paille de litière sur la qualité du fumier de bovins et sur son efficacité

Quantité de litière de paille par jour	Perte de N en 3 mois de stockage du fumier (%)	Récolte de pomme de terre (q/ha) après épandage de 20 t/ha de fumier	Augmentation de la récolte de pomme de terre
4 kg de paille non coupée	20,6	281,4	66,9
4 kg de paille coupée en morceaux de 10 cm de longueur	12,8	312,7	100,2

La quantité de fumier obtenu dans une exploitation dépend des espèces animales, du nombre des bestiaux, de la durée du maintien en étable, de l'affouragement et de la litière employée. La quantité de fumier fournie par l'exploitation peut être calculée d'après la formule $\left(\frac{K}{2} + L\right) \cdot 4$ où K est la matière sèche du fourrage, L, la quantité de litière, 4 un coefficient (la masse de fumier frais est le quadruple de la matière sèche du fourage).

On peut également déterminer la quantité totale de fumier obtenu par tête de bétail en un an, compte tenu des pertes pendant le travail et au pâturage (tableau 34).

Tableau 34

Quantité moyenne de fumier (t) par une tête de bétail par an

Durée de la période en étable	Bovins	Chevaux	Ovins	Porcins
De 220 à 240 (jours)	8-9	6-7	0,8-0,9	1,5-2
De 180 à 220	6-7	4-5	0,6-0,7	1,0-1

Avec un usage restreint de litière, le fumier obtenu est semi-liquide et son humidité atteint 85-87 %. L'accumulation du lisier, mélange de déjections solides et liquides du bétail, avec peu de litière permet de mécaniser entièrement le nettoyage des locaux à bestiaux, mais ce fumier semi-liquide n'est facile ni à transporter, ni à épandre. Les pertes d'azote, même quand ce fumier est conservé en fosses couvertes, atteignent de fortes proportions et avant de l'épandre, il faut préalablement en faire un compost avec de la tourbe ou de la terre.

Quand les animaux sont entretenus sans litière, le lisier obtenu est un mélange de purin, de bouses et d'une petite quantité d'eau ayant servi au nettoyage du local et des auges automatiques. Ce fumier de bovins contient 90 % d'eau; celui des porcs, jusqu'à

95-97 %. Il est fluide et peut facilement être transmis par tuyaux de son propre mouvement ou au moyen de pompes.

Les étables à lisier où le bétail est entretenu sans litière sont en usage dans les grandes fermes spécialisées et les complexes d'élevage.

Le rendement et la qualité du lisier dépendent de l'espèce et de l'âge des animaux, de l'affouragement, de la durée de l'engraissement et de l'entretien en étable, de la technologie du stockage (tableau 35).

Tableau 35

Composition du lisier

Composition (en % de la matière brute)	Bovins	Porcins
Eau	88,5	89,5
Matière sèche	11,5	10,5
Matière organique	8,6	5,2
Azote total	0,40	0,50
Azote ammoniacal	0,25	0,35
Phosphore (P_2O_5)	0,20	0,25
Potassium (K_2O)	0,45	0,24*
Magnésium (MgO)	0,10	0,10
Calcium (CaO)	0,15	0,20
Sodium (Na_2O)	0,12	0,10

* Avec aliments concentrés

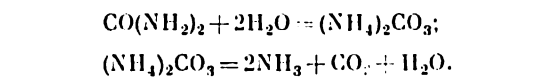
Dans les grands complexes d'élevage, le rendement de lisier représente, pour un taux d'humidité de 90 %, environ 40 000 tonnes par an pour 2000 vaches; environ 100 000 tonnes par an pour 10 000 jeunes bovins et près de 100 000 tonnes pour 100 000 porcs. L'utilisation d'une telle quantité de lisier n'est possible qu'avec une mécanisation totale et l'automatisation de tous les processus de transport, de stockage, d'utilisation.

Si l'on coupe d'eau le lisier jusqu'à un taux d'humidité de 95 %, son volume double; il augmente de 5 fois quand on le dilue jusqu'à un taux d'humidité de 98 %. L'emploi d'un système de nettoyage à l'eau entraîne une dilution du lisier de 4 à 6 fois et, en proportion, augmente le besoin de fosses pour le stockage et de moyens de transport pour l'évacuation et l'épandage du lisier. La dilution fait perdre, finalement, l'avantage économique de l'entretien des animaux sans litière en comparaison de l'entretien traditionnel sur litière. Il n'est avantageux de couper le lisier qu' immédiatement avant son épandage, au moment de l'arrosage ou de l'irrigation. Si le lisier n'est pas dilué, au moment de sa répartition 20 à 25 % des éléments nutritifs se trouvent précipités et leur majeure partie reste dans la fraction liquide. La technologie de l'emploi du lisier prévoit le stockage et l'utilisation non seulement de la fraction solide, mais aussi obligatoirement de la fraction liquide.

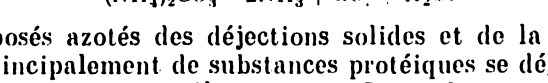
Le stockage du fumier

Dans une grande mesure, la qualité du fumier dépend de sa méthode de stockage.

Au cours de la conservation du fumier, sous l'influence des micro-organismes, les substances organiques azotées et non azotées se décomposent. L'urée et autres composés azotés organiques contenus dans les déjections liquides des animaux se transforment en ammoniac gazeux, source principale de la perte d'azote par le fumier. Sous l'influence de l'enzyme uréase, sécrété par les urobactéries, l'urée se transforme en carbonate d'ammonium qui se décompose facilement en ammoniac, dioxyde de carbone et eau :



$$CO(NH_2)_2 + 2H_2O = (NH_4)_2CO_3;$$



$$(NH_4)_2CO_3 = 2NH_3 + CO_2 + H_2O.$$

Les composés azotés des déjections solides et de la litière sont constitués principalement de substances protéiques se dégradant très lentement avec formation d'ammoniac. Les substances organiques non azotées du fumier sont surtout représentées par la cellulose et d'autres composés organiques facilement dégradables (sucres, amidon, pentosanes, pectines, acides organiques). Plus le fumier contient de paille et plus il renferme de composés organiques non azotés. Sous l'influence de l'air leur décomposition se fait jusqu'à l'acide carbonique et l'eau, elle s'accompagne d'une élévation de température du fumier jusqu'à 50 à 70 °C. En conditions anaérobies, la cellulose se décompose avec libération d'acide carbonique et de méthane.

Plus le fumier contient de substances organiques facilement dégradables et plus l'air y parvient librement, plus la décomposition est intense. Suivant les conditions de stockage, la décomposition du fumier s'accomplit avec une intensité variable et le fumier obtenu est de différentes qualités. Le fumier peut être conservé tassé, lâche ou d'abord lâche et ensuite tassé (stockage mixte).

Dans le premier procédé, dit froid, le fumier est conservé tassé, il est étalé en couches de 3 à 4 m de large et immédiatement tassé. Les piles ont 1,5 à 2 m de haut et une longueur qui dépend de la quantité de fumier. On recouvre le tout de tourbe, de paille ou de terre. Dans une pile ainsi tassée la température n'est pas élevée (15-30 °C), l'arrivée d'air est limitée, les pores non occupés par l'eau le sont par le gaz carbonique si bien que l'activité des micro-organismes se trouve entravée, raison pour laquelle la matière organique se dégrade lentement.

Le fumier frais n'est à moitié décomposé qu'au bout de 3 à 5 mois. Avec ce mode de stockage, les pertes d'azote sont assez minimes, elles n'excèdent pas 10 à 11 %. Le fumier renferme une appréciable quantité d'azote ammoniacal.

Les conditions d'une conservation tassée du fumier existent quand le bétail est entretenu libre sur une fumière profonde dont la litière n'est pas changée. Avec ce procédé, le fumier est quotidiennement

égalisé et recouvert d'une litière fraîche, à raison de 3 à 4 kg par tête de bétail. Ce sont les animaux qui tassent le fumier et sa décomposition est ralentie. On sort le fumier du local une ou deux fois par an pour le porter directement au champ ou bien on l'entasse dans une fumière.

Quand le fumier est conservé lâche, sans entassement, les pertes de matière organique et d'azote sont importantes, sa fermentation est irrégulière, il perd une partie de ses propriétés fertilisantes.

Quand le fumier est stocké d'abord lâche et ensuite tassé (stockage mixte) on commence par l'empiler sans le tasser sur une hauteur de 0,8-1 m. De cette façon, les processus microbiens se déroulent avec une bonne arrivée d'air, la substance organique du fumier se dégrade intensément, la température atteint 60-70 °C et les pertes d'azote sont considérables. Après quoi, on tasse soigneusement le fumier, l'arrivée d'air dans la pile n'a plus lieu, la température baisse jusqu'à 30-35 °C, la fermentation aérobie fait place à une décomposition anaérobie, les pertes de matière organique et d'azote diminuent. Sur cette première couche de fumier on en pose une seconde, puis une troisième et ainsi de suite jusqu'à ce que la pile s'élève à 2-3 m. Entassé, le fumier est conservé jusqu'à son transport au champ.

Avec ce moyen de stockage, la décomposition du fumier s'accélère considérablement, les graines des mauvaises herbes et les germes des infections intestinales y périssent, mais les pertes de matière organique et d'azote augmentent considérablement (tableau 36).

Tableau 36

Pertes de matière organique et d'azote suivant les différents modes de stockage du fumier (en % de leur teneur dans le fumier frais)

Mode de stockage	Litière de paille, pertes au stockage		Litière de tourbe, pertes au stockage	
	matière organique	azote	matière organique	azote
lâche	32,6	31,4	40,0	25,2
mixte	24,6	21,6	32,9	17,0
tassé	12,2	10,7	7,0	1,0

Le stockage mixte ne sera recommandé que si l'on utilise une forte quantité de litière et si le fumier contient beaucoup de paille. Un tel fumier doit être épandu aussitôt que possible, ou bien s'il est nécessaire d'obtenir rapidement de l'humus, ou qu'il faille désinfecter le fumier.

Les pertes d'azote au cours de la fermentation du fumier stocké sont fortement réduites si on lui ajoute (quand on l'empile) 3 % de son poids de farine de phosphorites. En formant des composts avec

farine de phosphorites, le fumier s'enrichit de phosphore, la décomposition de la matière organique s'accélère, une importante quantité de substances humiques s'accumule.

Le compost fumier-phosphorites mûrit en 2 ou 3 mois. Au cours de la fermentation du fumier par les micro-organismes, le phosphore de la farine de phosphorites prend une forme assimilable pour les plantes. En même temps, l'ammoniac libéré du fumier se trouve fixé et ses pertes diminuent fortement.

L'épandage de compost fumier-phosphorites produit un meilleur effet que des quantités équivalentes de fumier et de farine de phosphorites prises séparément ou mélangées, mais sans formation préalable de composts (tableau 37).

Tableau 3

Efficacité des composts fumier-phosphorites sur limon argileux podzolique engazonné

Epandage d'engrais	Pomme de terre		Blé de printemps	
	Récolte (q/ha)	Gain de récolte (q/ha)	Récolte (q/ha)	Gain de récolte (q/ha)
sans fumier	224	—	12,1	—
15-20 t/ha de fumier	307	83	14,7	2,6
Farine de phosphorites	272	48	13,2	1,1
Fumier + farine de phosphorites sans compost	314	90	16,5	4,4

Pour le stockage de grandes quantités de fumier, l'exploitation rurale doit être équipée de fumières et de fosses à purin.

Les fumières sont de deux genres: fosses ou dépôts à la surface. Lorsque le niveau des eaux souterraines est élevé, on accorde la préférence aux dépôts à la surface qui sont entourés de rebords de pierres, de briques ou d'autres matériaux. Dans les régions arides où le fumier se dessèche rapidement, on recommandera des fosses à fumier d'un mètre de profondeur au plus. Les fumières sont disposées sur des éminences à une distance de 50 m au moins des cours et des étables et à plus de 200 m des locaux d'habitation. La principale contrainte pour la construction d'une fumière est de bâtir un fond solide imperméable à l'eau (cimenté ou asphalté de préférence). Le long de la fumière, on creusera des rigoles pour détourner les eaux. Aux angles ou sur les côtés étroits, on creusera des fosses à purin, dont le fond et les bords seront étanches, la couverture hermétique. Pour permettre au purin de s'écouler dans les fosses, le fond de la fumière aura une pente légère de 2 ou 3° en direction des fosses. La capacité des fosses à purin dépend du volume de la fumière, pour 100 m^2 de surface, on doit prévoir 2 m^3 de capacité pour recueillir le purin. Des deux ex-

trémités, sur toute la largeur de la fumière, on pave ou on asphalte des accès d'entrée et de sortie et le long de la fumière tout entière, un chemin carossable de 2,5 m de large. Les dimensions de la fumière sont déterminées par la quantité et l'espèce du bétail, la durée du stockage, ainsi que par la quantité de fumier qui sera épandue directement sur le champ sans passer par la fumière (tableau 38).

Tableau 38

Surface (par animal) pour le stockage du fumier pendant 2,5-3 mois

Espèce animale	Surface (m^2)
Bovins adultes	2,0-2,50
Chevaux de labour	1,4-1,75
Jeunes bovins et chevaux	1,0-1,25
Porcs (en moyenne)	0,4-0,50
Ovins (en moyenne)	0,2-0,30

Une fumière conçue pour le stockage du fumier de 100 vaches obtenu en 2,5-3 mois (environ 300 tonnes) peut avoir les dimensions suivantes: environ 10 m de large, environ 20 m de long, hauteur ou profondeur de 1 m.

Le choix de la fumière dépend des conditions du lieu. Dans le stockage en fosse, le fumier est transporté des étables par câble suspendu, mais le chargement pour le transport au champ présente des difficultés. Au contraire, les dépôts à la surface rendent plus faciles les travaux de chargement et de déchargement du fumier.

Tout le fumier qu'on ne peut porter directement au champ pour l'épandre ou l'y laisser empilé doit être conservé en fumière. Le fumier doit être empilé sur le côté long de la fumière en blocs réguliers de 2 ou 3 m de large étroitement rapprochés les uns des autres. De cette façon, les pertes d'azote sont moins grandes et le fumier se divise d'après son degré de fermentation: d'un côté de la fumière, le fumier le plus décomposé; de l'autre, le fumier moins mûr. Les blocs sont recouverts d'une couche de tourbe ou de terre de 15 à 20 cm d'épaisseur.

Au champ, le fumier sera entassé en grandes piles (de 40 à 60 t) de 3 à 4 m de large et 1,5-2 m de haut.

Pour l'emplacement des piles on choisit un endroit sec et élevé et pour absorber le purin qui s'écoulera pendant la décomposition du fumier, on posera une couche de tourbe ou de paille coupée de 20 à 30 cm de hauteur. Le fumier empilé doit être bien égalisé sur les côtés et le dessus, afin que les parois soient perpendiculaires et le dessus en pente pour l'écoulement de l'eau. Par dessus, la pile sera recouverte d'une couche de 15 à 20 cm de terre ou de tourbe.

Il est inadmissible de laisser le fumier en petits tas sur le champ, car il s'évente et se dessèche, ses substances nutritives sont entraî-

nées par l'eau, les pertes d'azote atteignent 35 à 40 % et l'azote ammoniacal, accessible aux plantes dès la première année, est totalement perdu. L'action fertilisante du fumier baisse alors fortement.

Dans une grande mesure, la qualité du fumier dépend de la durée de son stockage. Plus cette durée est prolongée, plus grandes sont les déperditions de matière organique. Suivant le procédé de conservation et sa durée, le degré de fermentation du fumier varie.

D'après sa décomposition, on distingue les formes suivantes de fumier : le fumier frais, peu « fait » (la paille conserve presque totalement sa couleur et sa consistance), le fumier à moitié mûr (paille brun foncé se déchirant facilement), mûr (la paille s'est entièrement décomposée, le fumier représente une masse noire et tachante) et l'humus (masse terreuse et meuble).

A mesure que le fumier se décompose, sa masse se réduit considérablement par rapport à la masse initiale, mais sa teneur en azote, phosphore et potassium augmente (tableau 39).

Tableau 39

Composition du fumier (en %) suivant sa décomposition

Indices	Fumier			
	frais	à moitié mûr	mûr	humus
Teneur en azote	0,52	0,60	0,66	0,73
Teneur en phosphore (P_2O_5)	0,31	0,38	0,43	0,48
Teneur en potassium (K_2O)	0,60	0,64	0,72	0,84
Perte de poids de fumier par rapport au poids initial	—	15-30	environ 50	65-75

La teneur de l'humus en azote, phosphore et potassium est la plus élevée, mais pour obtenir 20 t d'humus, il faut avoir 60 à 80 t de fumier frais, alors que pour avoir 20 t de fumier à moitié mûr il n'en faut que 25 t de frais. Une énorme quantité d'azote est perdue quand on laisse le fumier parvenir à l'état d'humus ou même à sa maturité complète.

On ne recommandera pas non plus d'épandre du fumier de paille frais car la décomposition de la paille dans le sol s'accompagnera de l'apparition d'une grande quantité de micro-organismes qui consomment les composés azotés et phosphatés dissous dans le sol. En apportant, peu avant le semis, du fumier de paille au sol, on peut compromettre fortement la récolte de la première culture. De plus, le fumier frais peut contenir une grande quantité de graines de mauvaises herbes et provoquer une aération superflue du sol, nuisible dans les régions arides.

Le plus rationnel est d'utiliser le fumier à moitié mûr qui retient mieux l'azote, surtout ammoniacal et renferme plus de matière organique que le fumier bien « fait ».

La quantité effective de fumier dans les étables, dans les fumières et empilé dans les champs est déterminée d'après le volume qu'il occupe et la masse d'un mètre cube. La masse d'un mètre cube de fumier frais empilé lâchement ou au contraire tassé est respectivement de 300 et 400 kg; celle de fumier à moitié mûr, de 700 et 800 kg; celle du fumier fortement décomposé, de 800 à 900 kg. La masse d'un mètre cube de purin est d'environ une tonne.

Conservation du lisier

Pour conserver le lisier, on recommande l'installation de fosses dans les fermes et au champ. La capacité des fosses de fermes ouvertes ou fermées doit être égale à 25-40 % du volume de fumier liquide accumulé au cours de 2 ou 3 mois. Le reste, 60 à 75 %, est conservé au champ dans des fosses ouvertes dont le fond et les bords sont protégés par une pellicule de plastic et qui se trouvent au centre des massifs à fertiliser. Au stockage, le lisier se stratifie, forme des couches, il est donc nécessaire de le brasser périodiquement. Dans le cas où des conduites de lisier existent, tout le fumier liquide peut être stocké dans les fermes et transporté par pompage dans les fosses des champs ou directement dans les citernes-pulvérisatrices ou les installations d'arrosage. Les fosses de fermes sont prévues de 3000 à 5000 mètres cubes chacune au maximum. Leur fond et leurs parois doivent être soigneusement étanchéifiés et résister à l'agression du purin, le fond doit être en pente en direction du réservoir. La profondeur et la forme des fosses doivent permettre le pompage du fumier liquide et son brassage. Les capacités fermées doivent être munies d'une ventilation, étant donné qu'au stockage il s'y accumule ges gaz dont les mélanges peuvent être explosifs. Le lisier obtenu dans les grandes exploitations d'élevage de type industriel doit être désinfecté avant l'usage.

Le lisier des petites exploitations agricoles peut, en l'absence de maladies contagieuses aiguës, être utilisé comme engrais sans désinfection préalabbe, sauf pour les fumures d'appoint ou superficielles des légumes et des fruits.

La désinfection de grandes quantités de lisier dans les exploitations d'élevage importantes peut être réalisée sur des dispositifs d'épuration par traitement thermique ou des produits chimiques spéciaux. Le moyen actuellement le plus commode est la fermentation au méthane. Avec ce procédé de désinfection du fumier, il n'y a pas de pertes de matière organique et d'azote et, en même temps, on obtient un gaz combustible qui peut également être utilisé pour le chauffage.

Action du fumier sur le sol et les plantes

Le fumier à moitié mûr renferme une grande quantité de matière organique et exerce donc une action favorable sur les propriétés physiques, physico-chimiques et biologiques du sol. Un apport systématique de fumier accroît la teneur du sol en matière organique, réduit l'acidité et fait augmenter le degré de saturation par les bases. Les sols sablonneux, les limons sableux prennent du corps, leur pouvoir absorbant et leur pouvoir tampon augmentent, ce qui est important pour conserver l'humidité et les substances nutritives. Sous l'influence du fumier, les terres argileuses s'ameublissent, sont plus faciles à travailler, laissent plus facilement passer l'eau et l'air.

Le fumier apporte au sol une énorme quantité de micro-organismes. La matière organique du fumier est une source très accessible de nourriture et d'énergie pour leur activité vitale. C'est pourquoi l'apport de fumier renforce l'activité microbienne du sol et mobilise les ressources de substances organiques qu'il renferme.

Le fumier contient tous les éléments nutritifs nécessaires aux plantes. Les substances nutritives du fumier ne sont pas assimilables au même degré, cela dépend de leur qualité ainsi que des conditions pédoclimatiques. Une tonne de fumier à moitié mûr renferme 4,5 à 5 kg d'azote, 2 à 2,5 kg de phosphore, 6 à 8 kg de potassium.

Le coefficient d'utilisation de l'azote du fumier à moitié mûr par la première culture dépend de l'azote ammoniacal qu'il renferme et représente en moyenne 20 à 30 % de l'azote total. La première année, les plantes assimilent principalement l'azote ammoniacal. Dans les déjections solides des animaux et dans la litière, l'azote se conserve sous forme de composés organiques qui se minéralisent lentement dans le sol et sont faiblement utilisés par les plantes la première année. Dans les déjections liquides, l'azote revêt surtout la forme de composés solubles se transformant facilement en ammoniac. C'est pourquoi, plus la litière absorbe de déjections liquides, plus le fumier est riche en azote ammoniacal et plus l'action d'un tel fumier se fait sentir l'année même de son apport. Le fumier sur litière de tourbe renferme ordinairement plus d'azote ammoniacal, son efficacité au cours de la première année est donc beaucoup plus grande que celle du fumier sur litière de paille.

Le fumier de différents animaux renferme une quantité différente d'azote ammoniacal, c'est pourquoi l'utilisation de l'azote de différents genres de fumier n'est pas la même. Le fumier de moutons assure pour la première culture une utilisation de l'azote de 34 % ; le crottin de cheval, de 20 % ; les bouses de vache, de 18 % ; le fumier de porcs engraissés, de 30 % ; de porcs maigrement nourris, de 10 % seulement.

Le coefficient d'utilisation de l'acide phosphorique et surtout du potassium du fumier par la première culture est plus élevé que celui de l'azote. L'assimilation de P_2O_5 par les plantes est, la première année, de 30 à 40 % ; celle de K_2O, de 60 à 70 % de leur teneur to-

tale dans le fumier. C'est le potassium du fumier qui est le mieux utilisé au cours de la première année. La teneur totale du fumier en potassium est également plus élevée qu'en azote et surtout en phosphore.

Le fumier a un posteffet très prononcé. L'utilisation par la seconde culture de l'azote, du phosphore, du potassium du fumier est d'ordinaire respectivement de 20 à 25 %, 10 à 15 % et 15 à 20 % ; par la troisième, de 5 à 10 %, 0-5 % et 5 à 10 %.

L'apport de fumier assure avant tout l'alimentation des plantes en potassium. L'effet bénéfique du fumier est surtout déterminé par sa teneur en azote total et ammoniacal, car, dans la plupart des sols, c'est surtout l'azote qui manque pour une alimentation normale des plantes. L'apport systématique de fumier abaisse l'acidité du sol (une dose de 20 à 40 t/ha apporte 0,2 à 0,5 t de calcium et de magnésium calculés en carbonates), améliore l'alimentation des plantes en calcium, magnésium, soufre et oligo-éléments. Le gaz carbonique dégagé par la décomposition du fumier joue aussi un grand rôle dans l'alimentation des plantes. La décomposition de 30 à 40 t de fumier dégage quotidiennement de 35 à 65 kg de CO_2 qui enrichit la couche de l'atmosphère recouvrant le sol, ce qui améliore l'alimentation carbonée des plantes. En outre, en se dissolvant en partie dans l'eau du sol, le gaz carbonique agit favorablement sur la mobilisation des composés du phosphore, du potassium et d'autres éléments nutritifs peu solubles.

Efficacité du fumier et particularités de son emploi dans les diverses conditions pédoclimatiques

L'action directe du fumier dans l'année qui suit son apport et son posteffet dépendent de sa qualité et de la dose épandue, ainsi que des conditions pédoclimatiques. Dans la première année, le fumier de paille peu décomposé peut agir moins bien que durant la seconde et la troisième. Plus grande est la dose de fumier apportée, plus son action est forte, plus son posteffet est durable.

Sur les terres argileuses, le fumier se décompose plus lentement, son action se fait encore sentir six ou sept ans après l'épandage. Sur les limons sableux, le fumier se décompose plus vite et son posteffet n'est pas si prolongé, trois ou quatre ans environ. Dans une zone humide, le fumier mûrit plus vite que dans une zone aride où la décomposition se fait plus lentement, vu l'insuffisance d'eau dans le sol. C'est pourquoi, dans une zone riche en humus, l'action directe sur la première culture est plus grande, tandis que le posteffet, la deuxième et la troisième années, peut être moins grand. Dans une zone aride, le posteffet du fumier surpasse souvent l'action directe sur la première culture.

L'efficacité du fumier peut différer suivant les conditions pédoclimatiques, les particularités biologiques de la culture, la qualité du fumier, le moment et la technique de l'épandage.

L'apport de fumier produit le plus d'effet sur les sols pauvres en humus dans les régions suffisamment humides. Dans ces régions, la dose moyenne de fumier est de 20 à 40 tonnes à l'hectare.

Le fumier donne aussi un bon accroissement de récolte sur les chernozems riches en matière organique. La dose moyenne de fumier est ici de 15 à 20 tonnes à l'hectare.

Dans les régions arides, l'efficacité du fumier est plus basse que dans les régions plus humides. On l'épand à raison de 15 à 20 t/ha. Avec un travail convenable de la terre et d'autres mesures assurant l'accumulation et la rétention de l'eau, surtout en irrigation, l'efficacité du fumier dans les régions arides augmente fortement et l'on peut en augmenter la dose.

Les doses de fumier dépendent de sa qualité et de la quantité dont on en dispose, ainsi que de la culture fumée. Sous les plantes sarclées (maïs, pomme de terre, betterave sucrière, etc.) sont nécessaires de plus fortes doses que sous les céréales.

Le plus rationnel est d'épandre le fumier en même temps que les engrais chimiques. L'action de l'un et des autres augmente alors nettement. De nombreuses expériences montrent que si l'on épand simultanément des demi-doses de fumier et d'engrais minéraux on obtient de meilleures récoltes que si l'on donne séparément des doses entières de ces engrais.

Le fumier des fumières ou des piles entassées dans les champs sera épandu régulièrement au moyen d'épandeurs spéciaux (fig. 9) et immédiatement enfoui à la charrue. Si on laisse le fumier à la surface, ne serait-ce qu'une journée, il perd beaucoup d'azote ammoniacal et la fumure est moins efficace.

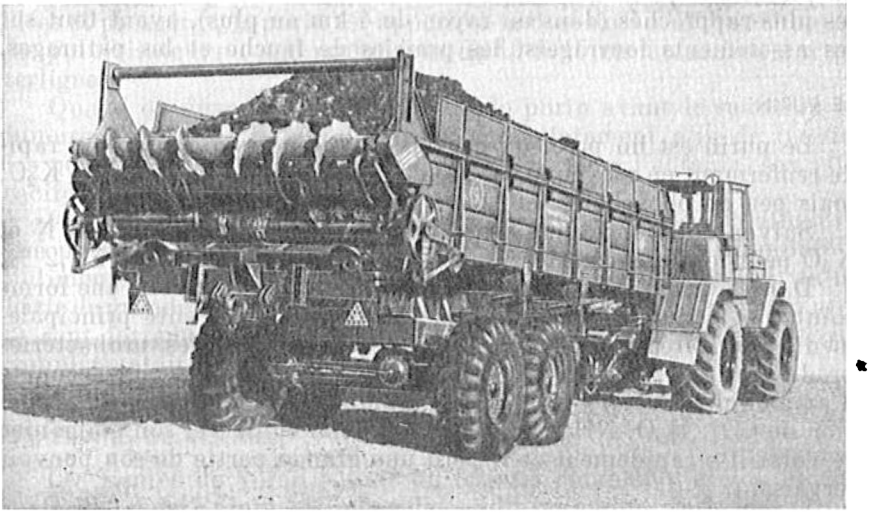


Fig. 9. Epandeur d'engrais organiques

Suivant les conditions pédoclimatiques, on enfouira le fumier à des profondeurs différentes. Dans les régions arides, l'enfouissement sera plus profond que dans les régions humides. Sur les terres lourdes où le fumier se décompose mal, il vaut mieux l'enfouir moins profondément et sur les sols légers, à une plus grande profondeur.

Il est préférable d'enfouir avant tout le fumier sous les cultures de plus grande valeur, donnant un bon accroissement de récolte et un avantage économique par rapport aux autres.

Utilisation du lisier

L'action et le posteffet du lisier non coupé d'eau sur les récoltes ne le cèdent en rien à l'efficacité du fumier de litière aux mêmes doses.

Pour transporter et épandre le lisier à la surface du sol on utilise des citernes et épandeurs spéciaux. Le transport et l'épandage du lisier peuvent se faire suivant les schémas suivants:

1. Fumière de ferme — citerne — fumière au champ — citerne — épandeur.
2. Fumière — réseau de conduites — installation d'arrosage — champ.

Avant l'arrosage le lisier apporté sous les cultures en dehors de leur végétation, est dilué dans le rapport 1 : 1 — 3, et dans la période de végétation, 1 : 8 — 10.

3. Fumière de ferme — conduites — fumière au champ — citerne — épandeur — champ.

Pour réduire les frais de stockage, de transport et d'épandage du lisier dans les grandes exploitations d'élevage de type industriel, on planifie l'épandage du lisier durant toute l'année sur les champs les plus rapprochés (dans un rayon de 4 km au plus), avant tout sur les assolements fourragers, les prairies de fauche et les pâturages.

LE PURIN

Le purin est un précieux engrais azoto-potassique d'action rapide renfermant en moyenne 0,2 à 0,25 % de N et 0,4 à 0,5 % de K_2O, mais peu de phosphore, 0,01 %.

Suivant les conditions de stockage, la teneur du purin en N et K_2O peut fortement varier: N de 0,02 à 0,8 % ; K_2O de 0,1 à 1,2 %.

Dans le purin, l'azote et le potassium se trouvent sous une forme soluble et accessible aux plantes. L'azote est représenté principalement par l'urée $CO(NH_2)_2$ qui, sous l'influence des urobactéries produisant l'enzyme uréase, se transforme rapidement en carbonate d'ammonium $(NH_4)_2CO_3$ qui se décompose facilement avec formation de CO_2, H_2O, NH_3. Si le purin est mal conservé, son ammoniac se volatilise rapidement et il perd une grande partie de son pouvoir fertilisant.

Le purin devra être conservé dans une fosse hermétiquement fermée. Dans ces conditions, les pertes d'azote diminuent car l'air dans

la fosse est rapidement saturé de CO_2 formé par la décomposition de l'urine et la dissociation de $(NH_4)_2CO_3$ avec formation d'ammoniac est freinée. Les pertes d'azote diminuent même davantage si l'on recouvre la surface du purin dans la fosse d'une fine couche de pétrole ou d'huile usagée.

Afin de réduire les pertes d'azote du purin, on peut également lui ajouter de 3 à 5 % de superphosphate qui fixe l'ammoniac avec formation de $NH_4H_2PO_4$.

La quantité totale de purin obtenue en une année de différentes espèces animales dépend de la durée de leur entretien en étable, de la quantité et de la qualité de la litière et de l'affouragement, de l'aménagement des étables et des fumières. Une tête de bovin durant sa période de vie en étable (220-240 jours) fournit en moyenne 2 à 2,5 m^3 de purin, la même quantité est obtenue de 3 jeunes bovins de moins de 2 ans et de 10 à 12 veaux.

Pour transporter et épandre le purin, on se sert d'épandeurs spéciaux. Le purin peut être apporté avant le semis et en fumure d'appoint, on l'utilise aussi pour la préparation de composts. Comme fumure de base, on peut l'épandre au labour et sur les sols légers, au binage ou au moment de la cultivation préalable au semis.

Sous les céréales, la pomme de terre, les plantes-racines on épand 15 à 20 t de purin à l'hectare ; sous les légumes, 20 à 30 t. Le purin ne contient presque pas de phosphore, c'est pourquoi il est nécessaire d'épandre en même temps des engrais phosphatés.

L'emploi du purin est extrêmement efficace en fumure d'appoint des cultures sarclées, des céréales d'hiver, ainsi que sur prairies. La fumure d'appoint des céréales d'hiver au début du printemps et celle des prairies se fait avant le hersage à raison de 4 à 5 t/ha de purin coupé de 2 ou 3 parties d'eau. En fumure d'appoint des cultures sarclées et potagères, le purin est apporté à la dose de 6 à 8 t/ha au moyen de pulvérisateurs à une profondeur de 10 à 15 cm au milieu des interlignes.

Quand on épand superficiellement le purin avant le semis ou en fumure d'appoint, il faut l'enfouir immédiatement afin de réduire les pertes d'azote. Si l'on tarde 2 à 4 jours pour l'enfouir, son efficacité diminue de 30 à 50 %.

En dehors de la période de végétation, le purin sera plutôt utilisé pour des composts avec de la tourbe ou de la paille impropre à l'alimentation ou avec d'autres matériaux. Il est alors inutile de bâtir de grandes fosses pour la conservation du purin, les pertes d'azote sont fortement réduites et l'exploitation profite d'une quantité complémentaire d'engrais organiques précieux.

LES FIENTES DE VOLAILLE

Les fientes de volaille sont un engrais complet d'action rapide renfermant de l'azote, du phosphore, du potassium sous une forme accessible aux plantes (tableau 40).

Composition des fientes de volaille et quantité annuelle par tête

Espèces d'oiseaux	Composition des fientes (en % de la matière brute)				Quantité annuelle (kg par tête)
	Eau	N	P_2O_5	K_2O	
Poules	56	0,7-1,9	1,5-2	0,8-1	5-6
Canards	57	0,8	1,5	0,4	7-8

La teneur des fientes de volaille en azote, phosphore, potassium varie fortement suivant la quantité et la qualité de la nourriture : plus la volaille reçoit d'aliments concentrés, plus les fientes renferment de substances nutritives.

Dans les fientes, l'azote revêt surtout la forme d'acide urique qui se décompose rapidement avec formation d'ammoniac. Si les fientes de volaille sont mal stockées, il y a par volatilisation de l'ammoniac de fortes pertes d'azote qui peuvent atteindre 50 % et plus en quelques semaines. Afin de retenir l'azote dans les fientes, il vaut mieux utiliser dans les poulaillers des litières de tourbe qui absorbent l'ammoniac libéré ou bien conserver les fientes mélangées à la tourbe. Les fientes brutes sont mélangées à des miettes de tourbe (1 partie de tourbe pour 4 ou 5 parties de fientes), le mélange est séché à l'air et on le conserve en hangar ou sous un auvent.

En l'absence de tourbe, on peut saupoudrer les fientes d'humus sec, de terre ou de fumier bien mûr ou bien leur ajouter 7 à 10 % de superphosphate qui fixe presque entièrement l'ammoniac formé.

Bien conservées, les fientes de volaille sont un engrais précieux ; elles pevent être utilisées sous toutes les cultures comme fumure de base à la dose de 1 à 4 tonnes à l'hectare avec enfouissement à la charrue, ainsi que comme fumure d'appoint.

Avant leur épandage, les fientes de volaille sèches doivent être émiettées, la dose sera diminuée de moitié. Pour les utiliser comme fumure d'appoint, il faut les diluer dans 6 ou 7 parties d'eau et les épandre à l'état de suspension, mais il ne faut pas les laisser longtemps dans l'eau pour éviter de fortes pertes d'azote.

LA TOURBE

La tourbe est un moyen important d'augmenter les ressources d'engrais organiques. Elle se forme par décomposition incomplète des plantes des marécages quand l'humidité est très grande et l'accès d'air insuffisant. La présence de réserves de tourbe permet de l'utiliser largement comme engrais, pour la préparation de divers composts et comme litière.

Les différentes tourbes et leur caractéristique agrotechnique

Suivant les conditions de leur formation et le caractère de la végétation prédominante, les tourbières sont divisées en trois types: superficielles, de fond, intermédiaires. La tourbe de ces trois genres de marais se distingue par sa qualité et ses propriétés agrochimiques.

La qualité de la tourbe est caractérisée par la composition botanique de la végétation du marécage, son degré de décomposition, son acidité, les cendres qu'elle fournit, sa teneur en azote et ses éléments minéraux.

D'après les débris végétaux prédominants, les tourbes sont : mousseuses, herbacées, ligneuses. Les plantes qui produisent la tourbe en déterminent la qualité comme engrais. Si les résidus végétaux de la tourbe sont surtout des mousses, la qualité de la tourbe comme engrais est assez basse; si ce sont les débris herbacés ou ligneux qui prédominent, cette tourbe a, comme engrais, plus de valeur.

Le degré de décomposition de la tourbe indique qu'elle contient des substances organiques humifiées résultant de la décomposition des plantes des tourbières. Plus est avancée le degré de décomposition de la tourbe, et plus grande est sa valeur comme engrais.

D'après le degré de décomposition, on distingue la tourbe peu décomposée renfermant au maximum 20 % de substances humifiées; moyennement décomposée en renfermant 20 à 40 % ; fortement décomposée avec une teneur de plus de 40 %.

La tourbe faiblement décomposée sera de préférence utilisée comme litière; la tourbe bien ou moyennement décomposée servira d'engrais pour préparer des composts.

Afin d'apprécier la qualité de la tourbe comme engrais, il importe de connaître son acidité (pH), sa teneur en éléments minéraux et en substances nutritives (tableau 41).

Tableau 41

Caractéristique agrochimique des différentes tourbes

Tourbe	pH de l'extrait aqueux salin	Teneur (en %) de la substance parfaitement sèche					
		matière organique	cendres	N	P_2O_5	K_2O	CaO
Superficielle	2,8-3,6	98-95	2-5	0,8-1,5	0,03-0,15	pas plus de 0,1	0,2-0,5
Intermédiaire	3,6-4,8	95-92	5-8	1,2-2,5	0,1-0,3	environ 0,1	0,5-2
De fond	4,8-5,8	92-85	8-15	2,5-3,5	0,2-0,5	jusqu'à 0,15	2-5

Toutes les tourbes sont pauvres en potassium, mais renferment beaucoup d'azote; la tourbe de fond riche en minéraux l'est particulièrement en calcium et en phosphore.

La *tourbe superficielle* renferme peu de minéraux, est très acide, pauvre en substances nutritives, renferme davantage de matière organique que la tourbe de fond, son pouvoir absorbant est fort : 1 kg de tourbe sèche peut absorber 8 à 15 l d'eau; son degré de décomposition n'est pas faible. La tourbe superficielle servira de préférence comme litière (surtout la tourbe faiblement décomposée) et pour la préparation de composts.

La *tourbe de fond* plus décomposée renferme davantage de minéraux, est plus riche en substances nutritives, a une réaction faiblement acide ou neutre. Elle renferme moins de matière organique que la tourbe superficielle et son pouvoir absorbant est moins grand.

La tourbe de fond sert surtout à préparer des composts et certaines tourbes de fond riches en phosphore ou en calcium peuvent être directement utilisées comme engrais.

Les tourbes vivianitiques renfermant de 2 à 15 % de P_2O_5 sous la forme d'oxyde ferreux phosphorique (vivianite $Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$) sont particulièrement précieuses. Les inclusions de vivianite dans la tourbe de fond ont l'aspect de couches intermédiaires de couleur bleue. La tourbe vivianitique peut être utilisée comme engrais phosphaté. Les tourbes de fond calcaires renfermant beaucoup de chaux (jusqu'à 15-40 %) peuvent être utilisées comme engrais calciques.

La *tourbe intermédiaire* occupe par sa teneur en substances nutritives, son acidité et ses éléments minéraux une place intermédiaire entre les tourbes superficielles et de fond. Les couches inférieures de la tourbe des tourbières intermédiaires se rapprochent de la tourbe de fond ; les couches supérieures, de la tourbe superficielle. Elle peut être utilisée pour la préparation de composts, ainsi que comme litière pour le bétail.

Utilisation de la tourbe en agriculture

Comme nous l'avons déjà indiqué, la tourbe superficielle sera surtout utilisée comme litière pour obtenir du fumier de tourbe; les tourbes de fond et intermédiaires, pour la préparation de différents composts, la confection de petits pots de tourbe et d'humus, pour le mulching.

On n'utilisera directement comme engrais à l'état pur que la tourbe de fond fortement décomposée, riche en minéraux, surtout la tourbe riche en calcaire (engrais de tourbe) et en phosphore (vivianite).

L'utilisation de la tourbe comme litière augmente considérablement l'accumulation de fumier et améliore sa qualité, la tourbe même devient alors un meilleur engrais. Chaque tonne de litière de tourbe sèche procure un gain complémentaire de 4-5 tonnes de fumier.

Pour la litière, les tourbes mousseuses, sphagneuses, ainsi que les tourbes herbacées, de roseaux peu décomposés conviennent mieux, elles sont capables d'absorber une grande quantité d'eau et de gaz. Quand on utilise une litière de tourbe, les conditions d'entre-

tien des animaux sont beaucoup meilleures: l'humidité relative des locaux d'élevage diminue, ainsi que leur teneur en NH_3 et CO_2.

Les composts de tourbe. Pour la préparation de composts on peut utiliser des tourbes de fond, intermédiaires et les tourbes superficielles plus décomposées. La majeure partie de l'azote de la tourbe se trouve sous une forme organique peu accessible et seule une part insignifiante (2 à 3 % de la quantité totale) revêt la forme de composés minéraux, ammoniac et nitrates.

La matière organique de la tourbe est très résistante à la décomposition microbienne, la minéralisation des composés organiques de l'azote se fait lentement. Beaucoup de tourbes ont une réaction acide, ce qui les empêche de se décomposer dans le sol. Les micro-organismes de la tourbe sont peu nombreux en raison de l'acidité, de l'insuffisance de formes solubles de l'azote et de substances organiques facilement assimilables. C'est pourquoi, l'utilisation de la tourbe pure comme engrais est peu efficace et souvent ne justifie pas, la première année, les frais de son emploi. L'efficacité de la tourbe augmente quand on en fait des composts avec les engrais organiques biologiquement actifs: fumier, purin, matières fécales ou avec des engrais minéraux: farine de phosphorites, chaux, cendre, etc.

Composts de tourbe et de fumier. Quand on fait des composts avec le fumier, la tourbe s'enrichit en micro-organismes, elle perd son acidité, l'activité microbienne est stimulée, la décomposition de la matière organique plus intense. Grâce à son grand pouvoir absorbant, la tourbe fixe entièrement l'ammoniac formé par la décomposition de la matière organique, les pertes d'azote du fumier diminuent fortement. Un compost de tourbe et de fumier bien préparé ne le cède en rien au fumier par son efficacité. L'action du compost augmente encore quand on lui ajoute 2 à 3 % de farine de phosphorites, ainsi que de 1 à 2 % de chaux si l'on se sert de tourbe acide. Pour faire des composts avec du fumier, il est bon d'utiliser de la tourbe éventée d'une humidité de 60 à 65 %.

Les composts de tourbe et de fumier sont préparés en plein champ à l'endroit de leur utilisation. La tourbe et le fumier sont entassés en piles d'au moins 3 m de large et de 1,5-2 m de haut. Au moment de la confection du compost on prend pour une partie de fumier 2 ou 3 parties et plus de tourbe. Plus est avancé le degré de décomposition de la tourbe, plus on en prend. On étale alternativement des couches de tourbe et de fumier d'une épaisseur de 15 à 20 cm, il est recommandé de saupoudrer chaque couche de farine de phosphorites à raison de 20 à 30 kg pour une tonne de compost.

Composts de tourbe et de purin. Le purin dont dispose une exploitation sera avantageusement utilisé pour des composts avec de la tourbe; les pertes d'azote à partir du purin sont alors fortement réduites et la valeur de la tourbe comme engrais augmente. Pour faire des composts avec du purin, toutes les tourbes conviennent, sauf celles qui sont calcaires. Pour une tonne de tourbe bien éventée on prend, suivant son degré d'humidité, de 0,2 à 1 tonne de purin.

Ordinairement, les composts de tourbe et de purin sont faits dans les champs, près du lieu de leur épandage. On creuse dans la pile de tourbe une rigole de 50 à 60 cm de profondeur et 1 m de largeur dans laquelle on verse le purin. Une fois le purin absorbé, on recouvre la rigole de tourbe. On peut empiler la tourbe en couches de 40 à 50 cm et verser du purin sur chaque couche.

Afin d'enrichir le composts en phosphore, il est recommandé de lui ajouter de la farine de phosphorites à raison de 20 à 30 kg par tonne de compost.

Les composts de tourbe et de purin peuvent être épandus 1-1,5 mois après leur confection. Pour l'efficacité, ils ne le cèdent en rien au fumier et souvent même le surpassent. Une tourbe bien décomposée limoneuse et arrosée de purin peut être immédiatement donnée au sol comme engrais sans faire de composts.

Composts de tourbe et de matières fécales. Les matières fécales renferment plus d'azote que le fumier. Une tonne de ces matières renferme de 10 à 11 kg de N ; 2-3 kg de P_2O_5 ; 2-2,5 kg de K_2O. L'azote s'y trouve sous la forme d'urée qui se décompose en donnant de l'ammoniac facilement volatilisé. Si les matières fécales sont épandues telles quelles, il y a de fortes pertes d'azote et la répartition irrégulière de ces matières sur le champ crée une récolte bariolée.

La formation de composts de tourbe et de matières fécales assure une utilisation plus rationnelle de la tourbe et de ces matières comme engrais. Les matières fécales sont ainsi désinfectées, les pertes d'azote fortement réduites, l'azote et les autres substances nutritives renfermées dans la tourbe deviennent assimilables. Toutes les tourbes peuvent être mélangées aux matières fécales. Plus la tourbe est humide, moins il faut prendre de matières fécales. Le mieux est d'utiliser de la tourbe de 40 à 50 % d'humidité. Pour 1 t de tourbe superficielle ou intermédiaire, on prendra 2 t de matières fécales; pour 1 t de tourbe de fond, 1 t de matières fécales.

Les composts de tourbe et de matières fécales sont empilés sur le champ à fumer: on étale une couche de tourbe de 20 à 25 cm, on y verse les matières fécales que l'on recouvre de la couche suivante et ainsi de suite jusqu'à une hauteur de 2 m. Les composts sont mis en conservation non moins de 1,5-2 mois et sont épandus comme fumure de fond.

La *farine de phosphorites, la chaux et les cendres* sont ajoutées régulièrement à la tourbe disposée en piles à raison de 2 à 4 %. Pour préparer ces composts on peut utiliser la tourbe superficielle, intermédiaire et de fond si cette dernière n'est pas carbonatée. Dans les composts de tourbe et de farine de phosphorites, l'acide phosphoritique de la farine devient assimilable. En même temps, sous l'influence de la farine de phosphorites, de la chaux et de la cendre, l'acidité de la tourbe est neutralisée, aussi les processus microbiens y sont-ils plus intenses, la décomposition est stimulée et une plus grande quantité de composés minéraux de l'azote s'accumule.

Pour accélérer la maturation des composts et augmenter leur ef-

ficacité, il est recommandable de leur ajouter une petite quantité (environ 5 %) d'engrais organiques biologiquement actifs: fumier, purin, matières fécales.

Les composts de tourbe peuvent être préparés directement sur la tourbière desséchée lors de l'extraction par tranches superficielles de la tourbe en été. A cette fin, les engrais sont épandus avant le travail superficiel de la tourbière et soigneusement mélangés au cours des extractions suivantes.

Emploi des engrais sur les tourbières asséchées

Immédiatement après leur asséchement ou après une extraction partielle de tourbe (prise de tourbe pour litière, confection de petits pots d'humus et de tourbe pour plantes ou mulching comme engrais) les tourbières sont utilisées pour la culture des céréales, des cultures maraichères ou fourragères, pour la création de prairies de fauche ou de pâturages.

Les sols tourbeux renferment une grande quantité de matière organique (85-95 % de la phase solide) et sont riches en azote. Ils ont un fort pouvoir d'absorption et peuvent contenir beaucoup d'eau, ils sont très perméables et occupent peu de volume pour une masse donnée. Dans les sols tourbeux, l'azote se trouve sous la forme de composés organiques résistant à la dégradation organique par les microbes. Dans les premières années de mise en valeur des tourbières surtout superficielles, acides et intermédiaires, la vitesse de la minéralisation de l'azote est assez limitée. Pour accélérer les processus microbiens et la mobilisation de l'azote dans ces sols, il est indiqué d'utiliser de petites doses de fumier, de purin, de matières fécales. Afin de mettre en valeur les tourbières acides superficielles et de fond, un chaulage est nécessaire. On le fait à demi-dose de la norme totale (déterminée d'après l'acidité hydrolytique) afin d'éviter une accumulation unilatérale de calcium dans le sol.

Les sols tourbeux sont pauvres en potassium (à l'exception des tourbes entremêlées de vase de rivière, riche en potassium) et souvent aussi pauvres en phosphore. Aussi, pour utiliser les tourbières comme prairies de fauche ou de pâturage ou, comme champs de culture, est-il avant tout indispensable d'utiliser des engrais potassiques et phosphatés, simples ou binaires. On apporte les engrais azotés dans les premières années d'utilisation des tourbières; dans la suite, seulement si elles sont exploitées d'une façon intense pour l'obtention de grandes récoltes de cultures potagères ou fourragères.

Ce qui caractérise les tourbières, c'est l'insuffisance de cuivre assimilable, aussi l'emploi d'engrais au cuivre est-il une condition indispensable pour obtenir un bon rendement des cultures agricoles sur ces sols.

L'ENGRAIS VERT

On appelle engrais vert ou sidération la culture en champ de certaines légumineuses et l'enfouissement de leur masse verte dans le sol, afin de l'enrichir en azote et en matière organique. On utilise pour la sidération des légumineuses annuelles et vivaces qui, par les bactéries des nodosités de leurs racines fixent l'azote atmosphérique et enrichissent le sol par les composés azotés qu'elles ont fixés. La culture d'engrais vert de légumineuses apporte sur 1 ha jusqu'à 40-50 t de masse verte renfermant 150-200 kg d'azote. Par sa teneur en azote, 1 t d'engrais vert vaut 1 t de fumier (tableau 42).

Tableau 42

Composition du fumier et de l'engrais vert

Engrais	Teneur en substances nutritives (kg par tonne)			
	N	P_2O_5	K_2O	CaO
Fumier mélangé	5,0	2,4	5,5	7,0
Masse verte de lupin	4,5	1,0	1,7	4,7
Masse verte de mélilot	7,7	0,5	1,9	9,7

Après l'enfouissement par labour et la minéralisation de la masse verte dans le sol, l'azote fixé sous forme de composés organiques passe à une forme minérale et est utilisé par les plantes suivantes, le coefficient d'utilisation de l'azote de l'engrais vert étant presque le double de celui de l'azote du fumier. De plus, l'engrais vert de légumineuses qui ont un système radiculaire bien développé et ayant un bon pouvoir pénétrant dans le sol, extraient les éléments nutritifs des horizons inférieurs, assimilent également le phosphore et les autres substances nutritives des composés peu solubles. C'est pourquoi,

Tableau 43

Influence de la sidération sur le rendement des cultures sur un sol sableux pauvre

Engrais	Rendement (q/ha)		
	Seigle	Pomme de terre	Avoine
sans engrais	5,8	130	7,8
Sidération (lupin)	11,2	184	9,7

lorsque se décompose la masse végétale enfouie, la couche arable s'enrichit non seulement d'humus et de composés azotés assimilables, mais aussi de phosphore, de potassium, de calcium. Sous l'influence de la sidération, l'activité microbienne est stimulée dans le sol, ce-

Fig. 10. Lupin jaune

Fig. 11. Lupin vivace

lui-ci devient capable d'absorber plus d'eau, son pouvoir absorbant augmente ainsi que sa saturation en bases et son pouvoir tampon, sa structure s'améliore. L'emploi de la sidération augmente considérablement la fertilité des sols et le rendement des cultures ultérieures (tableau 43).

L'efficacité et la durée d'action de l'engrais vert sont d'autant plus grandes que la quantité de masse verte enfouie dans le sol est plus élevée.

Pour obtenir un bon rendement de masse verte de légumineuses à engrais vert, il faut apporter au sol des engrais phosphatés et potassiques (45 à 60 kg de principe actif par hectare) et traiter les graines à la nitragine pour les contaminer de bactéries des nodosités. (La nitragine est un produit renfermant des bactéries des nodosités qui, en se développant sur les racines des légumineuses, assimilent l'azote atmosphérique).

En U.R.S.S, la sidération la plus répandue est le lupin. Il pousse bien et est capable de fournir une abondante masse verte aussi bien sur les plus pauvres sols sableux que sur les argiles les plus lourdes (fig. 10, 11).

Cependant, les lupins ne supportent pas une teneur élevée du sol en calcium, ils ne conviennent donc pas aux sols carbonatés et aux sols gris; sur ces terres, on utilise d'autres engrais verts: les pois d'hiver, les pois des champs, la vesce, le mélilot, le pois des brebis, etc.

Les engrais verts peuvent être utilisés comme culture autonome (comme culture d'occupation d'une jachère), comme culture intermédiaire (dans l'intervalle entre la récolte d'une culture et le semis de la suivante), ainsi que comme culture de fauche sur un autre terrain (légumineuses vivaces).

D'un grand avantage économique est le semis de lupins jaunes fourragers (ne renfermant pas d'alcaloïdes) sur jachères occupées avec double utilisation ultérieure : la masse verte est fauchée pour le foin, les chaumes restants (ou la jeune repousse) sont enfouis comme engrais.

Comme engrais local très efficace, bon marché et tout à fait accessible, la sidération a une importance particulière pour augmenter la fertilité des sols peu cultivés.

CHAPITRE 6

LES SYSTÈMES DE FERTILISATION

Une utilisation efficace des engrais est assurée s'ils sont employés suivant un système scientifique, compte tenu des conditions pédoclimatiques concrètes, des propriétés des engrais, des particularités de l'alimentation des diverses cultures, de leur alternance dans les assolements.

On entend par système de fumure (fertilisation) un complexe de mesures agrotechniques, organisationnelles et économiques de fumures rationnelles planifiées dans le but d'augmenter le rendement des cultures et la fertilité du sol. Dans la mise au point des systèmes de fumure il faut : prévoir des mesures d'accumulation maximale du fumier, d'approvisionnement en tourbe, en composts divers et autres engrais locaux, leur conservation et utilisation correctes ;

déterminer les besoins d'engrais (y compris les oligo-éléments), compte tenu du plan de leur livraison à la région économique où est située l'exploitation rurale et des besoins d'engrais afin d'obtenir le rendement des cultures prévu par le plan, dans la mesure des possibilités économiques de l'exploitation ;

mettre au point le plan de chaulage (ou de plâtrage), déterminer les besoins en chaux (plâtre) de l'exploitation d'après les années et les mesures d'approvisionnement et de transport ;

assurer le transport total et en temps voulu des engrais, leur conservation correcte, la mécanisation des travaux pour la préparation des engrais et leur épandage.

Toutes ces mesures doivent être étroitement liées au plan général économique et organisationnel de l'exploitation. De plus, il est nécessaire d'élaborer le système le plus rationnel d'utilisation des engrais dans les assolements.

On comprend par système de fumure dans l'assolement le plan de distribution des engrais minéraux et organiques entre les différentes cultures participants à l'assolement. Au moment de son établissement, il faut déterminer le rapport optimal entre les différents engrais, choisir les méthodes de fumure les plus efficaces, prévoir les doses, le moment et les méthodes de l'épandage suivant les particularités biologiques des plantes et leur alternance dans l'assolement, les propriétés des engrais, les conditions pédoclimatiques et autres facteurs.

C'est le système de fumure qui doit résoudre le problème de rendement maximal possible de l'assolement, de l'obtention de bonnes récoltes assurées pour toutes les cultures, de l'utilisation rationnelle de la fertilité du sol et de son augmentation, avec l'emploi le plus avantageux des engrais du point de vue agrotechnique et économique.

PRINCIPES ESSENTIELS DE L'ÉTABLISSEMENT DES SYSTÈMES DE FERTILISATION

Afin d'établir un système correct de fumure dans les assolements, il faut tenir compte de toute la diversité des conditions naturelles, agrotechniques, économiques et organisationnelles et de beaucoup d'autres dont dépend l'efficacité des engrais.

CONDITIONS PÉDOCLIMATIQUES

Les doses, le moment, les méthodes d'épandage des engrais exercent une grande influence sur leur efficacité. Sont également d'une grande importance la quantité des précipitations atmosphériques et la température au cours de la période de végétation. Dans les régions suffisamment humides, ainsi qu'irriguées, les engrais sont beaucoup plus efficaces et ils sont utilisés à fortes doses.

En l'insuffisance d'humidité, le gain de rendement assuré par les engrais baisse. Cependant, quand on donne des engrais, les plantes utilisent l'eau de façon plus économe et plus productive, c'est pourquoi, dans les régions insuffisamment humides, le rendement des cultures augmente beaucoup plus quand on a recours aux engrais que sans eux. Afin d'accroître les rendements dans les régions de faible pluviosité, toutes les mesures doivent être prises pour accumuler et conserver au maximum l'eau dans le sol. Dans ces conditions, il est particulièrement important d'enfouir profondément les engrais dans la couche la plus humide du sol, celle qui se dessèche le moins. Dans les régions arides (ou dans les saisons ou les années sèches des zones à pluviosité satisfaisante), un enfouissement peu profond des engrais de même que les fumures d'appoint fournissent un effet insignifiant. Dans les régions où la pluviosité est abondante, il vaut mieux épandre les engrais azotés, de même que les engrais potassiques sur les sols légers avant les semis pour éviter le lessivage des substances nutritives.

Pour choisir les genres et les formes d'engrais, établir les doses et les méthodes d'épandage il faut tenir compte des propriétés du sol.

Sur les sols acides pauvres en matière organique et en éléments nutritifs, des doses plus fortes d'engrais minéraux et organiques sont nécessaires, de même qu'un chaulage sur les sols acides. C'est en général l'azote qui, sur ces sols, est en premier minimum ; sur les limons argileux, c'est le phosphore qui tient la seconde place pour l'efficacité. Sur les sols sablonneux et les limons sableux, outre l'azote, le potassium a beaucoup d'importance ; sur les sols tourbeux et ma-

récageux, c'est le potassium qui représente le premier minimum. Sur sol acide, on utilise avec succès des engrais phosphatés peu solubles. Sur sols sablonneux et limons sableux podzoliques, les plus efficaces parmi les engrais potassiques sont les sels potassiques-magnésiens; parmi les engrais azotés, les sels d'ammonium (sous forme neutralisée) dont l'azote est moins entraîné par les eaux. Si l'on utilise des engrais renfermant de l'azote nitrique, il faut obligatoirement les épandre immédiatement avant la période d'utilisation maximale de l'azote par les plantes.

Sur les chernozems et autres sols foncés, c'est le phosphore qui est au premier minimum, ce sont donc les engrais phosphatés qui exercent l'action la plus forte. Sur les sols de réaction neutre ou alcaline, il n'est pas indiqué d'utiliser des engrais phosphatés peu solubles.

La granulométrie du sol joue un rôle important pour la circulation des substances nutritives des engrais, leur absorption et leur fixation dans le sol. Les sols de composition mécanique légère se distinguent non seulement par une moindre fertilité potentielle, mais aussi par un pouvoir tampon et un pouvoir absorbant moindres. On en tiendra compte pour choisir la forme d'engrais et établir la dose, le moment de l'épandage et le procédé d'enfouissement.

Pour utiliser correctement les engrais on fera une analyse du sol et de ses propriétés agrochimiques et pédologiques, afin de déterminer son acidité et ses teneurs en composés échangeables d'azote, de phosphore, de potassium.

La connaissance des propriétés agrochimiques du sol permet d'utiliser les engrais et de chauler de façon différenciée, ce qui augmente considérablement leur efficacité économique. Il est très important de tenir compte du degré de culture du sol et du caractère des engrais précédemment épandus. Sur des sols suffisamment cultivés et bien fumés au cours des cultures précédentes, les doses d'engrais organiques et minéraux peuvent être réduites. Cependant, sur de tels sols, l'efficacité de la fumure ne diminue pas; au contraire, elle s'élève.

L'effet des engrais dépend fortement aussi du niveau de l'agrotechnique. Le système de fumure est mis au point et réalisé en accord étroit avec tout le complexe des procédés agrotechniques de culture des plantes participant à l'assolement. Une bonne agrotechnique, à commencer par le travail du sol, la préparation de semences conditionnées, des semis et des soins aux cultures, etc., est la condition indispensable d'une utilisation au plus haut point efficace par les plantes des éléments nutritifs du sol et des engrais utilisés. Toute dérogation aux exigences de l'agrotechnique (mauvais travail du sol ou travail en dehors du moment propice, mauvaise qualité des semences, adventicité, etc.) empêche les engrais d'exercer complètement leur effet sur la récolte et sa qualité. Avec un bon savoir-faire des agriculteurs, l'efficacité des engrais augmente.

Les particularités de l'agrotechnique et le procédé de semis de diverses cultures influent sur la date et les procédés d'épandage. Ain-

si, sous les cultures sarclées, on peut, en plus de la fumure de base avant les semis et sur les lignes au moment des semis, apporter une partie des engrais comme culture d'appoint et les enfouir dans les interlignes au moment de leur cultivation. Sous les cultures semées en plein, les engrais doivent être apportés principalement avant les semis et sur les lignes, au moment des semis.

PARTICULARITÉS DE L'ALIMENTATION DES DIFFÉRENTES CULTURES ET CARACTÈRE DES ASSOLEMENTS

Quand on établit un système de fumure correct, il faut tenir compte des particularités de l'alimentation des diverses cultures. Les plantes cultivées se distinguent par la quantité consommée d'éléments nutritifs destinés à former la récolte, les rythmes d'absorption au cours de la période de végétation à durée variable, par le rapport entre les principaux éléments assimilés : azote, phosphore, potassium.

Les cultures plus exigeantes envers les éléments nutritifs réclament, toutes autres conditions étant égales, de plus fortes doses d'engrais.

Les diverses variétés d'une même culture peuvent fortement différer par leur exigence envers le régime nutritif. Les variétés hâtives ont une période plus brève d'absorption des substances nutritives et elles sont plus exigeantes envers les conditions d'alimentation que les variétés tardives. Mais même si leur durée de végétation est à peu près analogue, des variétés différentes peuvent réagir de façon différente à la fumure.

Une bonne fumure doit assurer les meilleures conditions d'alimentation des plantes durant toute la période de végétation en accord avec leur besoin en substances nutritives aux différentes phases de leur croissance et de leur développement.

L'établissement du système de fumure, le choix des doses, des dates et des procédés d'emploi des engrais doit tenir compte des différences de sensibilité des diverses cultures envers les concentrations de substances nutritives dans la solution du sol, surtout au début de la croissance, de faculté d'assimilation du système radiculaire et du caractère de son développement (puissance, profondeur de pénétration, etc.), de rapport avec la réaction du milieu. Il est surtout important d'établir une juste proportion des doses utilisées d'engrais azotés, phosphatés et potassiques, compte tenu du besoin biologique aux différentes périodes de la végétation. Une alimentation azotée exclusive surabondante, par exemple, peut provoquer une forte croissance prolongée des fanes des plantes-racines et à tubercules, retarder la formation de la partie marchande de la récolte et en faire baisser la qualité, provoquer, enfin, la verse des céréales. Un niveau d'alimentation élevé en phosphore est important pour hâter la maturation des cultures.

Il faut non seulement prévoir l'obtention de bonnes récoltes assurées, mais aussi l'amélioration de la qualité de la production.

Pour établir un système de fumure correct dans l'assolement, on tiendra compte aussi de l'importance agrotechnique et économique des différentes cultures. On ne saurait distribuer d'une façon égale entre tous les champs les engrais dont dispose l'exploitation, car, il serait alors impossible d'obtenir l'efficacité économique voulue.

Il y a, dans chaque exploitation, une culture primordiale qui a le plus d'importance pour la réalisation des plans de l'Etat. Dans la zone des terres non noires, le lin est une culture industrielle importante; en Ukraine, c'est la betterave sucrière et le blé d'hiver; dans les républiques de l'Asie centrale, le cotonnier; dans le Caucase du Nord et la vallée de la Volga, les céréales; dans les exploitations d'élevage, les cultures fourragères (maïs, plantes-racines); dans les banlieues des villes, la pomme de terre, les cultures maraîchères, etc. Les cultures primordiales de l'assolement doivent recevoir les engrais en premier lieu et en grandes quantités. En outre, parmi les plantes cultivées, il y en a qui, non seulement exigent davantage de substances nutritives mais qui répondent mieux aux engrais en assurant un gain de rendement élevé, c'est pourquoi, dans tous les assolements, il faut accorder plus d'attention à leur fumure. Pour les assolements comprenant surtout des plantes industrielles et d'autres cultures exigeantes en engrais, il faut prévoir une plus grande quantité d'engrais organiques et minéraux.

Un système de fumure correct ne doit pas seulement assurer un gain de rendement des cultures primordiales, mais aussi de toutes les autres cultures de l'assolement en leur apportant directement des engrais ou en utilisant le posteffet de la fumure des cultures essentielles. La durée du posteffet dépend des particularités des différents engrais.

Le fumier et les engrais phosphatés (surtout la farine de phosphorites) agissent favorablement, pendant plusieurs années, sur le rendement des cultures agricoles, le posteffet des engrais azotés et potassiques est insignifiant.

En établissant le système de fumure, il faut tenir compte aussi de l'ordre de succession des cultures, du caractère de la culture précédente et de son rendement. Par elle-même, la succession des cultures assure un plus grand rendement en comparaison de la monoculture. De plus, l'assolement facilite la lutte contre les maladies, les parasites et l'adventicité. Une succession de cultures bien conçue permet d'utiliser plus productivement les substances nutritives du sol, fait augmenter l'efficacité des engrais, aussi bien organiques que minéraux.

La fumure des diverses cultures de l'assolement dépendra de la culture précédente et de sa récolte, ainsi que de la quantité de racines et de chaumes qu'elle a laissée et de leur teneur en éléments nutritifs.

Si l'assolement est très chargé de plantes-racines et à tubercules,

de cultures fourragères et autres plantes exigeantes en potassium, le besoin d'engrais potassiques augmente, ainsi que leur efficacité. Suivant la composition des cultures et leur ordre de succession dans l'assolement, la question du chaulage se résout différemment.

Après les cultures sarclées qui, soigneusement menées, laissent le champ libre de plantes adventices et qui, en même temps, prélèvent du sol une très grande quantité de substances nutritives et sont récoltées tard, l'efficacité des engrais et le besoin qu'en ont les cultures suivantes augmentent, surtout si le rendement des cultures précédentes a été très élevé et que les engrais leur avaient été donnés en quantité modérée. Sous les plantes succédant à des cultures bien fumées, les doses d'engrais peuvent être réduites. Après des légumineuses herbacées vivaces et des légumineuses à grains qui enrichissent le sol en azote, mais l'appauvrissent en phosphore et en potassium, le besoin d'engrais azotés diminue, tandis que se trouve renforcée l'action des engrais potassiques et phosphatés.

Ainsi , la répartition les engrais d'après les sols dépend de l'importance économique et agrotechnique de la culture, de sa place dans l'assolement, du caractère des cultures précédentes et du degré de fumure de chaque sol.

ASSOCIATION DU FUMIER AUX ENGRAIS MINÉRAUX

Pour une bonne répartition des engrais d'après les sols, il importe de combiner correctement les engrais organiques et minéraux. L'académicien D. Prianichnikov disait que l'apport conjoint de fumier et d'engrais minéraux « permet de fournir aux plantes une nourriture assimilable abondante aux premiers stades du développement et de leur donner, en même temps, sous la forme du fumier, une réserve de substances nutritives à action permanente », c'est-à-dire assure les meilleures conditions d'alimentation des plantes durant toute la période de la végétation. En outre, un apport simultané d'engrais organiques et d'engrais minéraux affaiblit l'influence néfaste de l'acidité physiologique et de la concentration élevée des substances nutritives qui se manifeste surtout quand on emploie de fortes doses d'engrais minéraux. Les expériences montrent qu'un apport combiné de demi-doses de fumier et d'engrais minéraux assure généralement de plus grands gains de rendement que lorsqu'on épand séparément des doses entières de chacun de ces engrais. L'effet d'un apport combiné de fumier et d'engrais minéraux est particulièrement prononcé sur les sols d'une composition mécanique légère, sols sablonneux et limons sableux, ainsi que sur les limons argileux peu cultivés (tableau 44).

Chaque exploitation ne dispose pas d'ordinaire de suffisamment d'engrais organiques pour tous les champs. Il faut donc les épandre avec des engrais minéraux sous les cultures les plus exigeantes et d'une plus grande valeur économique, surtout celles qui fournissent de plus grands gains de rendement pour chaque tonne de fumier épandu. Le

fumier exercera alors son posteffet sur toutes les autres cultures de l'assolement qui n'ont pas reçu des engrais minéraux. Si l'exploitation des assolements maraîchers ou spécialisés, ils seront pourvus en possède engrais organiques en premier lieu et en quantités abondantes.

Tableau 44

Efficacité d'un apport combiné de fumier et d'engrais minéraux

Culture	Sols	Rendement (q/ha)			
		sans fumure	engrais minéraux	fumier	fumier+ +NPK à demi-doses
Betterave sucrière	Limon sableux faiblement podzolique	194,9	242,2	283,4	320,8
	Sol gris forestier	228,9	272,4	259,0	281,9
	Chernozem lessivé	168,5	211,0	197,0	218,5
Pomme de terre	Limon sableux podzolique engazonné	72,0	149,0	218,0	249,0
	Limon argileux podzolique engazonné	214,0	268,0	281,0	294,0

Sur tous les terrains, entre autres, sur les chernozems, il faut ajouter au fumier surtout des engrais azotés. Sur les sols lourds peu humifiés, des engrais azotés et phosphatés. Sur les limons sableux et les sols sablonneux, l'importance des engrais phosphatés est moins grande, mais le rôle des engrais azotés et potassiques augmente.

CHOIX DES DOSES D'ENGRAIS MINÉRAUX

Quand on met au point un système de fumure de l'assolement, un des problèmes les plus compliqués et les plus importants, c'est de fixer les doses d'engrais pour obtenir le rendement planifié des cultures diverses. Les doses d'engrais dépendent des particularités de l'alimentation des diverses plantes (de leur besoin total en substances nutritives, de l'intensité de l'absorption de ces dernières au cours de la période de végétation, du niveau du développement du système radiculaire et de son pouvoir d'assimilation), ainsi que du degré de fertilité du sol (teneur en formes assimilables de substances nutritives, granulométrie, pouvoir absorbant, réaction, etc.). Ce n'est qu'en tenant soigneusement compte de tous ces facteurs que l'on peut choisir correctement les doses d'engrais et les rapports entre les différentes variétés de ceux-ci.

Le niveau de rendement planifié à obtenir joue un rôle important dans le choix des doses d'engrais. Plus ce rendement est élevé, plus il faut apporter d'engrais. Cependant, on n'oubliera pas que le rendement n'est pas en rapport direct avec l'augmentation des doses d'engrais que jusqu'à un certain niveau lorsque le plus grand rem-

boursement de l'unité de fumure est assuré par la production agricole. Dans un intervalle de doses assez restreint, le rendement produit par un apport complémentaire d'engrais augmente tant par unité de surface que calculé par unité de fumure.

Une augmentation ultérieure des doses d'engrais s'accompagne d'un accroissement du rendement par unité de surface, mais la valeur des gains absolus de rendement fournis par des doses accrues et le remboursement d'une unité de fumure par la production finissent par se réduire. Une fois le rendement maximal stable de l'unité de surface atteint, toute augmentation ultérieure des normes de fumure ne sert pratiquement à rien. L'augmentation des doses d'engrais est économiquement justifiée tant que la valeur du gain de rendement couvre les frais causés par l'utilisation d'un supplément d'engrais.

Ainsi, quand l'exploitation dispose d'une quantité d'engrais limitée, on choisira une norme qui permette d'obtenir le meilleur remboursement d'une unité de fumure. Quand les besoins d'engrais sont pleinement satisfaits, le but principal consiste à assurer le plus grand rendement possible d'une unité de surface et de résoudre le problème de l'amélioration de la fertilité du sol.

La base dont on se sert pour établir les doses optimales et les rapports entre les éléments nutritifs apportés est le résultat d'expériences au champ.

Les expériences au champ sur les engrais dans les différentes zones pédoclimatiques du pays doivent se faire suivant des schémas uniques par des stations expérimentales, des instituts de recherches agricoles, des laboratoires d'agrochimie.

La généralisation des résultats d'expériences au champ géographiques met en évidence les dépendances entre l'efficacité des engrais et les conditions pédoclimatiques, l'agrotechnique et les autres facteurs, permet d'élaborer des recommandations concernant l'emploi des engrais.

Les résultats des expériences au champ permettent:

d'établir la valeur des gains stables moyens de rendement des cultures agricoles assurés par l'apport de différentes doses de diverses variétés d'engrais et de leur combinaison;

de déterminer les doses optimales et les rapports entre les principaux éléments nutritifs permettant d'obtenir une efficacité agronomique et économique maximale;

d'établir les besoins en engrais d'après les régions et des zones économiques naturelles du pays.

En URSS, la répartition des engrais minéraux entre les régions économiques et les cultures agricoles se fait suivant un plan sur la base de l'estimation agroéconomique des données du Réseau géographique d'expériences au champ des services d'agrochimie. Elle se fait compte tenu des conditions pédoclimatiques, de l'importance économique des plantes cultivées et de l'efficacité économique des engrais en partant des besoins du pays en différents genres de pro-

duction agricole et du niveau atteint de développement de l'industrie des engrais.

Les plus grandes normes d'engrais sont utilisées sous les principales cultures industrielles: cotonnier, betterave sucrière, pomme de terre, lin à fibre longue, tabac, cultures potagères, cucurbitacées dans les principales régions de leur culture. Actuellement, ces cultures reçoivent autant d'engrais qu'elles en ont besoin. Ces dernières années ont vu considérablement augmenter l'emploi des engrais minéraux sous les céréales. L'accroissement de la production du grain en U.R.S.S. est assuré surtout aux dépens d'un large emploi d'engrais minéraux sous les céréales, principalement dans les régions suffisamment humides ou irriguées. L'accroissement de la production des engrais et de leur livraison à l'agriculture permettra d'assurer plus entièrement les besoins en éléments nutritifs non seulement des cultures céréalières, mais aussi fourragères.

Dans les régions suffisamment humides ou irriguées où l'on cultive les principales plantes agricoles on emploie de plus fortes doses d'engrais.

Les doses moyennes d'engrais recommandées pour les différentes zones sont établies pour le niveau planifié de la production agricole, en partant de l'approvisionnement réel en engrais.

Tableau 45

Exemples de correctifs aux doses moyennes d'engrais pour les différentes cultures suivant le taux de phosphore et de potassium échangeables sur les sols gris forestiers et podzols engazonnés

Teneur dans le sol	Céréales	Légumineuses à grain et herbes	Lin	Cultures sarclées	Légumes
		Engrais phosphatés			
très basse	1,3-1,5	1,5-2,0	1,3-1,5	pas de récolte sans cultivation préalable	
basse	1,0	1,0	1,0	1,3-1,5	
moyenne	0,6-0,7	0,7-0,9	0,6-0,7	1,0	1,2-1,5
supérieure à la moyenne	en lignes	0,6-0,5	0,5	0,5-0,7	1,0
élevée	ne pas en donner	ne pas en donner	0,2-0,3	en lignes	0,6-0,8
très élevée	idem	idem	en lignes	ne pas en donner	en lignes
		Engrais potassiques			
basse	1,0	1,5	1,5-2,0	1,3-1,5	1,5-2,0
moyenne	0,6-0,7	1,0	1,0-1,5	1,0	1,3-1,5
supérieure à la moyenne	ne pas en donner	0,7-0,8	0,8-1,0	0,6-0,8	1,0
élevée	idem	0,5-0,6	0,7-0,8	0,5	0,6-0,8

Les correctifs aux doses moyennes d'engrais recommandées selon la teneur du sol en éléments nutritifs sont précisés par les établissements scientifiques d'agrochimie de zones pour les différentes plantes agricoles conformément aux conditions de leur culture (tableau 45).

Les résultats des recherches agrochimiques ont révélé des différences importantes dans le niveau d'approvisionnement des sols de l'Union Soviétique en formes échangeables d'éléments nutritifs (tableau 46).

Tableau 46

Proportions des surfaces de terres labourables ayant des taux différents de phosphore mobile et de potassium échangeable d'après les zones de l'URSS (en % de toute la surface des labours, 1972)

Sols	Surface des terres labourables					
	Taux du phosphore mobile			Taux du potassium échangeable		
	bas	moyen	élevé	bas	moyen	élevé
Zone des terres non noires						
Podzols engazonnés	68,7	20,8	10,5	46,5	30,6	22,9
Zone de la forêt-steppe						
Chernozems gris forestiers podzoliques	39,1	37,8	23,1	13,8	24,7	61,5
Zone des steppes						
Chernozems typiques ordinaires et méridionaux	49,7	33,0	17,3	6,1	23,4	70,5
Zone de la steppe aride						
châtains	62,8	31,3	5,9	3,3	15,7	81,0
Zone désertique						
gris, gris de prairie et de prairie	75,0	18,0	7,0	17,1	27,1	55,8

Les sols des différents champs d'une exploitation se distinguent aussi fortement par le niveau de fertilité et la teneur en éléments nutritifs mobiles. Quand on met au point un système de fumure on utilise les moyennes pondérées d'approvisionnement des sols des champs d'assolement. Les différences de teneurs en formes mobiles des éléments nutritifs pour chaque terrain cultivé sont également prises en considération pour établir les plans annuels de fumure (fig. 12).

Les laboratoires agrochimiques de zones et les établissements scientifiques effectuent constamment de vastes recherches afin d'établir les rapports entre les indices agrochimiques du sol et l'ef-

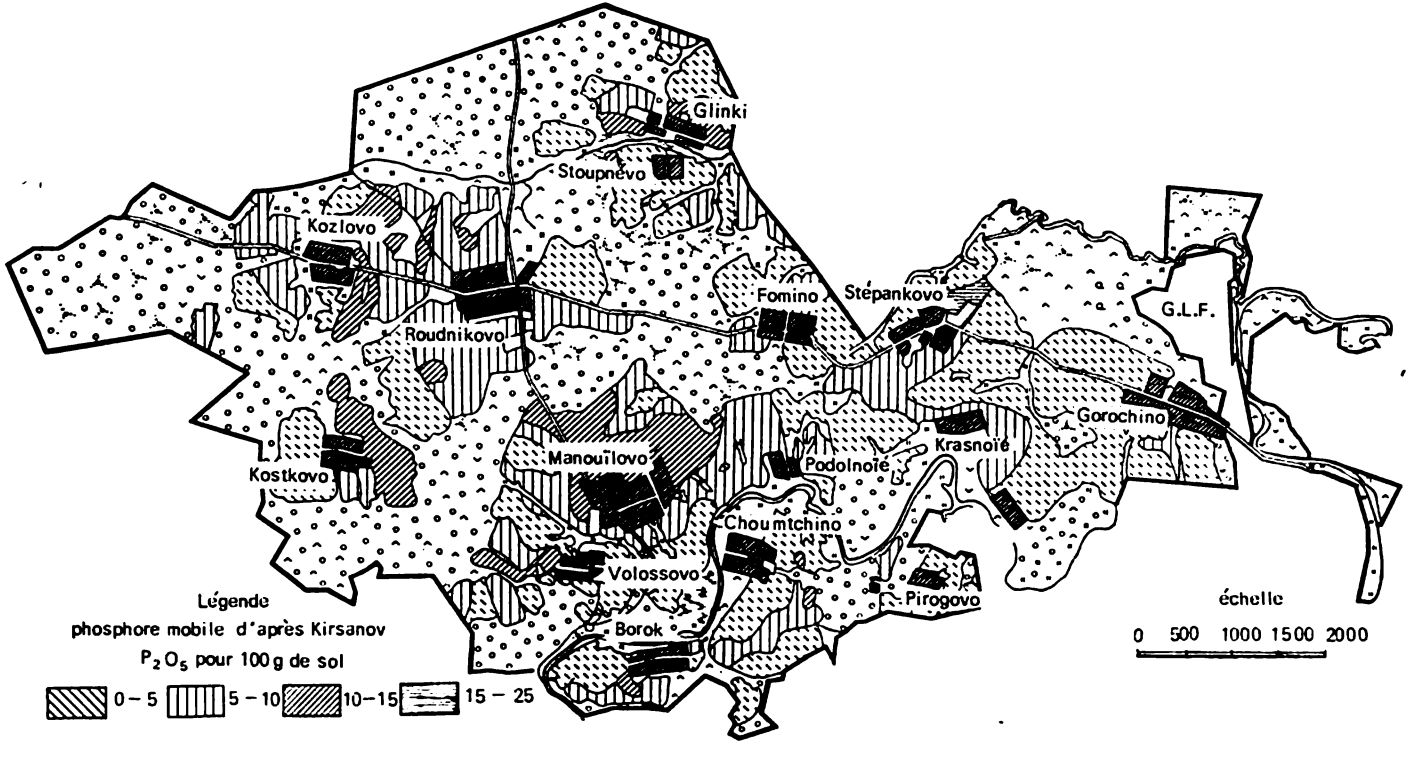


Fig. 12. Carte de la présence de phosphore mobile dans les sols de l'exploitation

ficacité des engrais. Dans les expériences au champ sont examinées les doses des principaux éléments nutritifs permettant d'obtenir le niveau planifié de rendement des principales cultures agricoles dans les conditions pédoclimatiques concrètes et pour un approvisionnement varié du sol en formes mobiles de substances nutritives. Sur la base des résultats de ces expériences, on établit des recommandations pour l'emploi des engrais en vue d'assurer une récolte planifiée, compte tenu des moyennes agrochimiques (tableau 47).

Tableau 47

Doses d'engrais recommandées pour les plantes cultivées sur des limons argileux podzoliques engazonnés (méthode complexe)

Récolte planifiée (q/ha)	Dose d'engrais organiques (t/ha)	Dose d'engrais azotés (kg de principe actif)	Doses d'engrais phosphatés (kg de principe actif)				Doses d'engrais potassiques (kg de principe actif)		
			≤ 5	5-10	10-15	15-20	≤ 5	5-10	15
			Approvisionnement des sols en phosphore mobile, mg pour 100 g de sol				Approvisionnement des sols en potassium mobile, mg pour 100 g de sol		
Orge, blé									
12-14	—	30-40	40	30	20	10	30	20	—
16-20	—	50-60	60	50	30	10	40	30	—
25-30	—	80-90	*	80	60	20	60	40	30
35-40	—	90	*	90	80	60	—	80	60
Seigle sur jachère de pois-avoine et vesce-avoine									
12-14	—	60	60	40	30	20	60	40	30
16-18	—	80	80	60	40	20	60	40	30
20-25	40	60	90	60	40	20	80	60	40
Pomme de terre sur fumier									
140-160	40	60-80	—	60	40	20	80	60	60
180-200	40	90-100	—	80	60	40	120	90	60
220-250	60	100-120	—	90	80	60	140	120	90
Plantes-racines (rutabaga, betterave, carotte, turneps)									
300-400	60	80-90	—	80	60	40	100	90	90
500-600	80	100-120	—	90	80	60	140	120	90
Lin à fibre longue sur champ de trèfle									
15-20 (3-4)	—	20	80	60	40	40	60	60	40
25-30 (5-6)	—	30	90	80	60	40	90	80	60
35-40 (7-8)	—	30-40	—	90	80	60	120	100	80

* Avec une faible teneur en phosphore et potassium, ce rendement n'est pas planifié.

La généralisation de nombreuses expériences au champ a permis d'établir aussi les doses optimales et le rapport NPK nécessaire pour obtenir le niveau voulu de rendement des plus importantes cultures agricoles dans les principales régions de leur production (tableau 48).

Tableau 48

Proportions des éléments nutritifs et des doses d'engrais optimales recommandées par les services d'agrochimie pour les principales zones de l'U.R.S.S. et pour un rendement donné de différentes cultures

Régions de culture	Nombre d'expériences généralisées	Doses optimales de substances nutritives (kg/ha)	Rapport $N : P_2O_5 : K_2O$
Blé d'hiver (35-40 q/ha)			
Caucase du nord	131	140	1 : 1 : 0,3
Régions centrales de chernozem	52	140	1 : 1,2 : 1,2
Région du Donietz et du Dniepr	426	135	1 : 1,4 : 1
Sud-Ouest	276	155	1 : 1,3 : 1
Midi	205	130	1 : 1,2 : 0,7
Seigle d'hiver (20-25 q/ha)			
Centre	52	170	1 : 1 : 0,8
Sud-Ouest	71	180	1 : 0,7 : 1,3
R.S.S. de Lithuanie	34	180	1 : 1 : 1
R.S.S. de Biélorussie	170	200	1 : 1 : 1,3
Blé de printemps (15-20 q/ha)			
Vallée de la Volga	331	110	1 : 1,2 : 0,5
Sibérie occidentale	216	115	1 : 1,1 : 0,7
Sibérie orientale	206	105	1 : 1,2 : 0,4
R.S.S. de Kazakhie (sauf le sud)	168	55	0 : 1 : 0
Sud de la R.S.S. de Kazakhie	115	120	1 : 1,4 : 0,6
Pomme de terre (200 à 250 q de tubercules/ha)			
Centre	229	205	1 : 0,7 : 0,8
Sud-Ouest	170	225	1 : 0,7 : 0,8
R.S.S. de Biélorussie	210	225	1 : 1,4 : 1,4
Betterave sucrière (250 à 300 q de racines/ha)			
Chernozem du centre	141	200	1 : 1,25 : 1,1
Caucase du nord	70	155	1 : 1,3 : 1,1
Donietz-Dniepr	293	200	1 : 1 : 0,9
Sud-Ouest	386	220	1 : 1,1 : 1,1
Cotonnier (coton brut 25-30 q/ha)			
R.S.S. d'Ouzbékie	39	340	1 : 0,7 : 0,14
R.S.S. de Tadjikie	70	340	1 : 0,5 : 0,3
R.S.S. de Turkménie	54	290	1 : 0,6 : 0,2
R.S.S. d'Azerbaïdjan	162	275	1 : 1 : 0,5

Afin d'établir approximativement les besoins en engrais minéraux pour un rendement planifié, on fait appel à différentes méthodes de calcul basées sur le prélèvement d'éléments nutritifs par les plantes et les coefficients d'utilisation des substances nutritives à partir du sol et des engrais.

L'exportation des principaux éléments nutritifs avec les diverses récoltes peut fortement varier suivant les conditions de culture. Il vaut donc mieux, pour les calculs, utiliser les données sur le prélèvement obtenues dans l'exploitation ou dans des conditions pédologiques analogues par les établissements de recherche voisins. Il est admissible de se servir de données statistiques sur l'exportation moyenne de NPK par unité récoltée, mais ce procédé est grave d'erreurs.

Les coefficients d'utilisation de l'azote, du phosphore et du potassium du fumier et des engrais minéraux (données moyennes au tableau 49) sont également soumis à des variations notables sui-

Tableau 49

Coefficients possibles d'utilisation des substances nutritives à partir des engrais suivant les années et la rotation des cultures

Engrais	Années d'action	Coefficients d'utilisation, %		
		N	P_2O_5	K_2O
minéraux	En 1 rotation	70-80	30-50	70-90
	y compris:			
	la 1ère année	60-70	15-30*	60-70
	la 2e année	3-5	10-15	10-15
	la 3e année		5-10	
organiques	En 1 rotation	50-60	50-60	80-90
	y compris:			
	la 1ère année	20-30	30-40	50-60
	la 2e année	15-20	10-15	10-20
	la 3e année	10-15	jusqu'à 5	jusqu'à 10

* Suivant la forme et le procédé d'épandage : 20 à 30 % des formes granulées, 10 à 20 % des formes pulvérulentes, meilleure utilisation en épandage local qu'en épandage à la volée.

vant la culture, les conditions pédoclimatiques, les doses, le moment de l'épandage et le procédé d'enfouissement des engrais, etc.

Pour déterminer les doses d'engrais en vue d'obtenir un gain de rendement voulu il faut disposer de données sur le niveau du rendement sans engrais (ou avec une quantité insignifiante d'engrais). Le tableau 50 montre des exemples de calcul des besoins en engrais pour un gain de rendement planifié d'après l'exportation des éléments nutritifs, compte tenu de l'approvisionnement du sol en formes mobiles de substances nutritives.

De la même façon, on peut calculer les doses d'engrais pour tout le rendement voulu.

Les méthodes de calcul des engrais pour un rendement planifié incluent l'appréciation de l'exportation possible d'éléments nutritifs aux dépens des formes mobiles à partir des réserves du sol. Cependant, les coefficients d'utilisation des substances nutritives du sol par les diverses cultures peuvent varier largement de 2 à 20 % et même plus pour le phosphore et de 10 à 55 % pour le potassium. Par conséquent, ces méthodes ne peuvent être mises à profit qu'en présence de moyennes expérimentales d'utilisation des éléments nutritifs à partir des formes mobiles du sol et dans des conditions pédoclimatiques concrètes.

On utilisera des méthodes de calcul variées, afin de vérifier l'exactitude du système de fumure mis au point sur la base de doses expérimentales ou fixées par les normes sous les différentes cultures de l'assolement et pour apprécier les gains probables de rendement pour les normes admises d'engrais organiques et minéraux.

Le bien-fondé des doses admises et des proportions d'engrais dans les assolements peut être vérifié en comparant l'apport et la dépense d'éléments nutritifs, c'est-à-dire en déterminant le bilan global des éléments nutritifs.

Le rapport entre l'exportation des éléments nutritifs par les récoltes d'un assolement avec leur quantité dans la composition des engrais organiques et minéraux épandus permet de se faire une idée générale de la façon dont est compensée la dépense d'éléments nutritifs du sol, sans tout de même révéler l'aspect quantitatif de l'utilisation réelle des éléments nutritifs des engrais par les plantes. Le bilan global est utilisé avec profit pour l'estimation générale du prélèvement du sol et de l'apport au sol d'éléments nutritifs, les engrais étant fournis parcimonieusement, quand la récolte se formait surtout aux dépens de la fertilité du sol et de l'azote biologique.

Pour mieux apprécier l'efficacité du système de fumure dans l'assolement (ou l'exploitation) il faut tenir compte de l'utilisation des éléments nutritifs des engrais par les plantes au cours d'une rotation et dans les différents sols des moyennes d'utilisation des engrais organiques et minéraux apportés au cours des 3 premières années. Ces données sont établies en généralisant les résultats d'expériences au champ de nombreuses années sur les fumures des assolements, en accord avec les conditions pédoclimatiques.

Pour faire le bilan des éléments nutritifs dans l'assolement ou dans ses sols, il faut tenir compte du niveau de fertilité potentielle du sol, de la composition des plantes cultivées, du degré d'assimilation par celles-ci des éléments nutritifs apportés avec les engrais et d'autres facteurs.

Ainsi, sur les sols peu humifiés, surtout les sols légers, il faut agir de façon que l'apport d'azote par les engrais dépasse son prélèvement de 15 à 20 % au moins. Sur les sols riches en matière organique et, par conséquent, en azote, cet élément peut être déficitaire. Sur les sols lourds riches en potassium, le bilan de cet élément peut souffrir un déficit de 20 % (évidemment, il faut tenir compte de la

Tableau 50

Exemples de calcul des besoins en engrais d'après l'exportation des substances nutritives par la récolte planifiée et l'approvisionnement du sol en divers éléments nutritifs (d'après D. Fédorovski)

Indice	Blé			Maïs-fourrage			Chou		
Rendement planifié (q/ha)		20			300			600	
Rendement de la culture sur champs non fumés (moyenne de 2-3 ans) (q/ha)		12			135			300	
Gain à assurer (q/ha)		8			165			300	
Exportation approximative (kg) avec la récolte par tonne de production principale	N 35	P_2O_5 10	K_2O 24	N 5,2	P_2O_5 1,0	K_2O 2,8	N 2,5	P_2O_5 1,0	K_2O 3,0
Augmentation du prélèvement (kg) pour obtenir le gain	28	8	19	86	16	46	75	30	100
Apport de fumier (t/ha)	Non				10			Non	
Teneur du fumier en éléments (kg)				50	25	60			
% d'assimilation la première année				25	30	75			
Quantité qui sera utilisée à partir du fumier (kg)	0	0	0	12,5	7,5	45	0	0	0
Quantité d'engrais minéraux à apporter (kg)	28	8	19	72	8,5	1	75	30	100

Utilisation des engrais minéraux la 1e année (%)	65	20	70	65	20	70	65	20	70
Quantité de substances nutritives à apporter (kg)	43	40	27	111	42,5	1	115	150	143
Teneur des engrais en substances nutritives	nitrate d'ammonium, 34%	superphosphate, 20%	chlorure de potassium, 60%	nitrate d'ammonium, 34%	superphosphate, 20%	chlorure de potassium, 60%	nitrate d'ammonium, 34%	superphosphate, 20%	chlorure de potassium, 60%
Dose d'engrais calculée d'après l'exportation (q/ha)	1,2	2,0	0,5	3,3	2,1	0,5	3,4	7,7	2,5
Approvisionnement du sol en différents éléments nutritifs	bas	bas	bas	bas	moyen	bas	bas	très élevé	très bas
Changement possible	0	0	0	0	réduire	0	0	réduire	augmenter de 25%
Dose d'engrais recommandée en accord avec la carte agrochimique (q/ha)	1,2	2,0	0,5	3,3	1,5	0,5	3,4	1,0	3,0

présence dans l'assolement de plantes exigeantes en potassium), mais sur les sols sablonneux et les limons sableux, une déficience de cet élément est inadmissible. Le bilan du phosphore doit toujours être positif avec un excès de l'apport sur le prélèvement de 50 % au moins. Quand les sols sont pauvres en formes mobiles de phosphore et que le phosphore est mal assimilé à partir des engrais, pour entretenir et améliorer la fertilité du sol, l'apport de cet élément doit dépasser de 2 à 2,5 fois son exportation par la récolte.

Par conséquent, pour établir le système de fumure d'un assolement il faut prévoir de mettre à profit la fertilité naturelle du sol et, pour un niveau plus élevé de l'emploi de la chimie à l'agriculture, il importe non seulement de rétablir la fertilité du sol, mais aussi d'élargir sa reproduction.

La méthode des bilans est également appliquée pour estimer les besoins d'engrais et les caractéristiques du cycle des substances organiques dans l'exploitation suivant les régions naturelles économiques et administratives, ainsi que dans l'ensemble du pays.

Le calcul du bilan économique intérieur, de même que du bilan de l'assolement inclut la comparaison de l'exportation des substances nutritives par la récolte (de toutes les variétés de productions récoltées dans le champ) avec leur restitution par l'apport d'engrais. Ces articles du bilan ont le plus d'importance dans la structure des pertes et de la restitution des éléments nutritifs. Outre l'exportation par la récolte, le bilan économique total peut également tenir compte des pertes d'éléments nutritifs des engrais et du sol. Quant à la restitution, elle se fait non seulement par les engrais, mais encore par les graines, les précipitations atmosphériques, les légumineuses (azote).

Quand les légumineuses vivaces tiennent une place importante dans la structure des surfaces ensemencées, la fixation de l'azote joue un rôle considérable.

Dans le calcul du bilan économique extérieur, il faut établir le rapport entre les pertes d'éléments nutritifs emportés par la production marchande avec leur apport par les engrais organiques et minéraux, les fourrages et les semences venus du dehors.

A l'échelle du pays, les bilans se font soit en faisant la somme des calculs réalisés pour les zones et les régions, soit sur la base des moyennes pondérées d'exportation d'éléments nutritifs par chaque culture (compte tenu des particularités de chaque zone pour l'exportation par unité de production), de la structure existante ou planifiée des champs, du rendement et de l'approvisionnement en engrais organiques et minéraux.

Les calculs de bilan viennent compléter les données expérimentales sur l'efficacité des engrais dans les différentes zones pédoclimatiques et constituent la base scientifique de la répartition des engrais minéraux entre les régions économiques naturelles, les zones administatives, les exploitations, ainsi que parmi les cultures. Le défaut de cette méthode, c'est que pour établir les recettes et les dépenses du

bilan il faut faire appel à un grand nombre de normes de calcul. Dans les calculs de bilan, on peut obtenir des résultats plus sûrs en déterminant l'importance de l'exportation, les moyennes de prélèvement des éléments nutritifs sur les engrais et d'autres indices dans les expériences au champ sur les engrais, dans les assolements type et les conditions pédoclimatiques concrètes.

De cette façon, la détermination des doses optimales d'engrais se fait sur la base des méthodes expérimentales, celles des normes et des bilans.

Afin de mettre au point un système de fumure en partant de l'approvisionnement réel en engrais minéraux, on recourt le plus souvent aux doses moyennes par zones fixées par les normes et précisées par les indices agrochimiques du sol. Pour les principales cultures des assolements on peut alors calculer par différentes méthodes les doses d'engrais pour le rendement voulu.

Le système de fumure pour un rendement planifié élevé de toutes les cultures de l'assolement peut être mis au point si les engrais minéraux sont fournis selon les besoins. Un tel niveau de ravitaillement en engrais est atteint en U.R.S.S. dans les principales régions de culture des plantes industrielles essentielles, ainsi que dans les régions industrielles à haute densité de population. Dans ces conditions, le rôle des calculs, surtout ceux de bilan, pour la détermination des doses d'engrais augmente constamment.

Quand on détermine les doses optimales d'engrais, les résultats les plus sûrs peuvent être obtenus en se basant sur les données d'expériences de plusieurs années et associées à différentes méthodes de calcul pour vérifier l'exactitude des rapports entre les différents éléments nutritifs, ainsi qu'à une estimation agroéconomique préalable.

Quand on planifie le niveau de rendement des cultures et le choix des doses d'engrais, il faut tenir compte de tout le complexe des facteurs naturels, économiques et organisationnels et des particularités de l'alimentation des plantes. Vu que l'application de la chimie à l'agriculture augmente constamment, la culture générale du travail des champs, l'observation rigoureuse de l'agrotechnique et les mesures de bonification des terres acquièrent une importance croissante. La sélection, ainsi que l'implantation de variétés à haut rendement extrêmement sensibles à l'apport d'engrais jouent également un rôle énorme.

PROPRIÉTÉS, DÉLAIS ET PROCÉDÉS D'APPORT DES ENGRAIS

Quand on établit le système de fumure de l'assolement, il importe de tenir compte de la solubilité et de la réaction physiologique des engrais, de la mobilité des éléments nutritifs apportés au sol, de la présence d'autres composants (Na, Cl, Mg), des particularités de l'interaction avec le sol, de la durée de l'action et d'autres pro-

priétés qui déterminent dans une grande mesure les doses, les délais et les procédés de leur apport. L'action des engrais non seulement sur le rendement, mais aussi sur la qualité de la production dépend du choix convenable des variétés et des formes d'engrais. Elle dépend des conditions pédoclimatiques et des particularités biologiques des plantes.

La dose annuelle d'engrais sous les diverses cultures peut être apportée à des moments et par des moyens différents. Les délais et les procédés d'épandage doivent assurer les meilleures conditions d'alimentation des plantes pendant toute la végétation et les plus grands gains de rendement pour chaque quintal d'engrais épandu. D'après les délais de l'apport, on distingue la fumure avant le semis ou de fond (de base), la fumure au semis (sur lignes, en poquets) et après le semis ou d'appoint pendant la période de la végétation.

Comme *fumure de fond* avant le semis, on donne du fumier et d'autres engrais organiques et, en général, le gros de la dose totale des engrais minéraux fournis à la culture envisagée. Le but de la culture de fond est d'assurer l'alimentation des plantes pendant toute la végétation. Avant le semis, les engrais sont épandus à la volée par des semeuses spéciales (engrais minéraux, chaux), des épandeurs de fumier (engrais organiques) et d'autres mécanismes. Un procédé prometteur pour l'apport d'engrais avant le semis, surtout du superphosphate, est l'épandage en bandes, local. Avec la distribution locale, la fixation du phosphore du superphosphate dans le sol est moindre et son assimilation par les plantes est meilleure.

La fumure phosphoro-potassique de fond est principalement enfouie par labour profond. Les engrais parviennent ainsi dans une couche du sol plus humide, moins soumise à l'assèchement, où se développe la majeure partie des racines actives. Un enfouissement profond assure une meilleure utilisation des engrais par les plantes. Il est particulièrement important d'enfouir profondément l'engrais phosphaté avant le semis, étant donné que, dans le sol, le phosphore ne se déplace pratiquement pas, tout en étant fixé par voie chimique.

En culture irriguée et dans les régions humides, surtout sur les sols sablonneux et les limons sableux, les engrais azotés seront apportés immédiatement avant le semis et enfouis au cultivateur. De cette façon, les pertes d'azote nitrique sont moindres ainsi que celles des nitrates formés lors de la nitrification des engrais ammoniacaux et de l'urée. Dans les régions pauvres en précipitations atmosphériques, on peut commencer par épandre, sur les sols lourds, les engrais ammoniacaux solides et liquides, ainsi que l'urée. Sur les sols légers, à faible pouvoir absorbant, il est recommandé, pour éviter les pertes de potassium par lessivage, d'apporter les engrais potassiques simultanément avec les engrais azotés juste avant le semis et sous les cultures sarclées, une partie de ces engrais peut être apportée avec la fumure d'appoint.

Quand les engrais sont épandus à la volée (suivie d'un enfouissement par charrue ou au cultivateur), ils se répartissent sur une

aire étendue et se mélangent à un grand volume de terre, c'est pourquoi, à proximité des racines faiblement développées des jeunes plantes il peut n'y avoir qu'une quantité insuffisante de substances nutritives.

Afin de mieux assurer l'alimentation des plantes, il est utile d'apporter, au début de la croissance outre la fumure de base, une petite quantité d'engrais au semis sur les lignes ou dans les poquets. L'apport d'engrais *au semis* se fait par des semeuses combinées spéciales.

Pour toutes les cultures agricoles, il est particulièrement important d'épandre en lignes du superphosphate granulé, car au début de leur croissance, les plantes sont très sensibles à une déficience de phosphore. Sous les céréales, le superphosphate granulé peut être épandu avec les semences au moyen de semeuses ordinaires. En même temps que le superphosphate on épand également, au semis, de petites doses d'engrais azotés et potassiques. Dans ce cas, les engrais doivent être épandus par des semeuses combinées. Sous les cultures sensibles à de hautes concentrations d'éléments nutritifs au voisinage des racines, le maïs, par exemple, il vaut mieux épandre les engrais à une certaine distance (2-3 cm) à proximité ou sous les graines afin qu'elles en soient séparées par une couche de terre.

Les engrais apportés sur les lignes ou dans les poquets à la profondeur de l'ensemencement ne sont utilisés par la plupart des plantes que dans la première période de leur croissance, leur dose ne doit donc pas être forte. Si les éléments nutritifs apportés dans les poquets ou sur les lignes peuvent être utilisés par une culture durant une période plus prolongée, la pomme de terre, par exemple, surtout si le sol est suffisamment humide, les doses d'engrais au semis peuvent être augmentées.

L'engrais apporté au semis en quantités suffisantes pour assurer aux plantes les normes des éléments nutritifs aisément assimilables au début de leur vie a également beaucoup d'importance pour le développement ultérieur des plantes. Des conditions d'alimentation favorables dès le début de la végétation permettent aux jeunes plantes de constituer un système radiculaire plus puissant, ce qui assure pour la suite une meilleure utilisation des éléments nutritifs du sol et de la fumure de fond. Grâce à l'épandage en lignes, les plantes se développent plus vite et supportent mieux une sécheresse passagère, sont moins abîmées par les parasites et les maladies, répriment plus facilement les mauvaises herbes.

L'apport au semis de petites doses d'engrais minéraux est le meilleur moyen de leur assimilation par les plantes, il assure de plus grands gains de rendement pour chaque quintal d'engrais. C'est surtout l'épandage en lignes du superphosphate granulé qui est efficace (tableau 51).

L'apport systématique de fortes doses d'engrais fait augmenter progressivement la teneur en formes mobiles d'éléments nutritifs, notamment de phosphore et l'effet de l'épandage en lignes peut

diminuer. L'épandage en lignes du superphosphate est d'une grande importance pour la culture des céréales et d'autres plantes dans les régions arides où une quantité limitée d'engrais se trouve utilisée et où le phosphore est souvent l'élément du premier minimum.

Tableau 51

Efficacité de l'épandage en lignes dans les différentes zones pédoclimatiques de l'U.R.S.S.

Sols	Cultures	Rendement témoin (q/ha)	Gain de rendement (q/ha)	Remboursement d'un quintal de superphosphate par le gain de rendement en grain (q/ha)
Podzols engazonnés (52 exp)	Céréales d'hiver	20,5	3,4	6,8
Chernozems, gris forestiers et châtains (117 exp.)	Idem	22,2	2,8	5,6
Moyenne pour l'U.R.S.S. (169 exp.)	Idem	21,6	3,0	6,0
Podzols engazonnés (29 exp.)	Blé de printemps	16,2	3,0	6 0
Chernozems, gris forestiers et châtains (60 exp.)	Idem	15,8	2,0	4,0
Moyenne pour l'U.R.S.S. (89 exp.)	Idem	15,9	2,3	4,6

Dans la période de végétation, les *fumures d'appoint* sont utilisées comme complément de la fumure de fond et au semis dans le but d'améliorer l'alimentation des plantes aux périodes de consommation intense des substances nutritives. Par exemple, le cotonnier absorbe le gros de l'azote et d'autres éléments nutritifs dans la période allant du début de la floraison à la maturité en masse, c'est pourquoi une grande partie des engrais azotés et une partie des engrais potassiques sont utilisées comme fumure d'appoint associées à des arrosages et à des binages des interlignes.

Les fumures d'appoint sont largement utilisées sur les prairies permanentes et les pâturages ensemencés, sur les prés naturels. Le report d'une partie des engrais azotés et potassiques dans la fumure d'appoint des cultures sarclées est tout indiqué sur les sols légers dans les régions ayant un niveau élevé des eaux souterraines. Il est utile de donner en fumure d'appoint une partie des engrais et d'en fournir une forte dose aux cultures sarclées.

Le report d'une partie des engrais de la fumure de fond avant le semis dans la fumure d'appoint des cultures sarclées en doses moyennes ne produit ordinairement pas d'effet en comparaison de l'apport de la quantité tout entière d'engrais avant le semis.

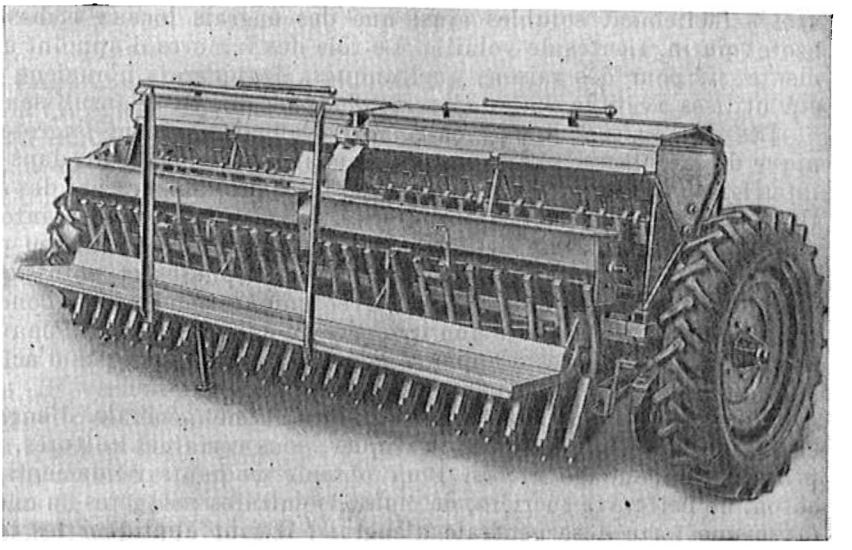


Fig. 13. Epandeur d'engrais minéraux

L'effet produit par les engrais apportés en fumure d'appoint et enfouis à peu de profondeur dans les interlignes des cultures sarclées dépend pour beaucoup des conditions d'humidité au cours de la végétation. Dans les régions plus humides ou irriguées, l'efficacité de la fumure d'appoint est plus grande que dans les régions peu humides. Le mieux est d'utiliser en fumure d'appoint des engrais

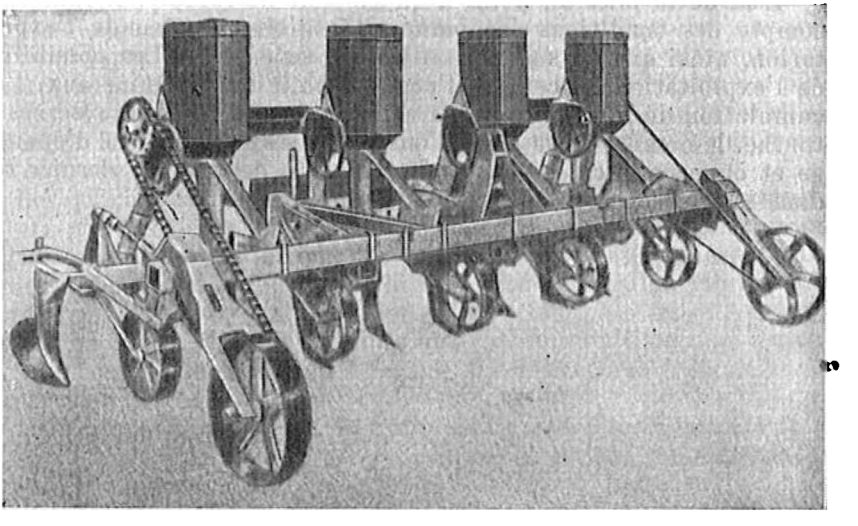


Fig. 14. Cultivateur universel

azotés facilement solubles ainsi que des engrais locaux riches en azote : purin, fientes de volaille. Le rôle des fumures d'appoint augmente si, pour des raisons quelconques, des engrais n'avaient pas été utilisés avant le semis ou l'avaient été en quantité insuffisante.

Les engrais sont donnés en fumure d'appoint suivant l'agrotechnique de la culture, soit superficiellement à la volée, soit dans les interlignes avec enfouissement à différentes profondeurs par des cultivateurs-épandeurs, soit au cours d'un binage ultérieur des interlignes (fig. 13, 14). L'apport superficiel ou un enfouissement peu profond à la fumure d'appoint des engrais phosphatés et potassiques sont moins efficaces que l'apport avec enfouissement au labour.

Dans les régions arides non irriguées ou dans les périodes pauvres en pluies, les fumures d'appoint ne produisent souvent pas d'action positive sur la récolte et peuvent même la faire diminuer.

Suivant le rendement recherché, la norme générale d'engrais et autres conditions on peut pratiquer, sous certaines cultures, des procédés d'épandage divers. Pour obtenir de hauts rendements de coton, de betterave sucrière, de maïs, de cultures potagères ou autres (avec une forte dose générale d'engrais) il faut appliquer les trois procédés d'épandage : avant le semis, au semis et en fumure d'appoint. De cette façon, les engrais se répartissent en différentes couches du sol et assurent donc de meilleures conditions d'alimentation des plantes durant toute la croissance.

Pour la plupart des cultures, on pratique le plus souvent la fumure de fond associée à la fumure au semis. Quand la quantité d'engrais minéraux dont dispose l'exploitation est limitée, il est indiqué, avant tout, de prévoir l'apport le plus économique : localement (sur lignes, en poquets) au moment du semis.

Lors de la mise au point d'un système de fumure, il faut tenir compte des conditions économiques et d'organisation de l'exploitation, ainsi que de son ravitaillement en engrais. Les possibilités de l'exploitation concernant l'acquisition d'engrais minéraux, l'accumulation de fumier, la préparation de composts et de réserves de tourbe, le nombre de sa main-d'œuvre, de ses installations d'épandage et de ses véhicules sont également loin de jouer le dernier rôle dans la réalisation d'un système de fumure correct.

CHAPITRE 7

LES PARTICULARITÉS DE LA NUTRITION ET DE LA FERTILISATION DES CULTURES EN AFRIQUE OCCIDENTALE

Les besoins des plantes en éléments nutritifs ne sont pas identiques, ils varient suivant les phases de croissance et de développement, ce dont il faut tenir compte en élaborant des recommandations pour l'emploi des engrais. La canne à sucre, par exemple, consomme le plus d'azote et de potassium au cours de la formation de la tige et le plus de phosphore quand la récolte mûrit. Les plantes-racines absorbent l'azote, le phosphore et le potassium plus régulièrement durant toute la période de végétation. Les oléagineuses consomment régulièrement le phosphore durant toute la végétation, mais avec un certain maximum à la phase de la fructification.

Souvent, les cultures tropicales sont très exigeantes envers certains éléments de l'alimentation minérale. La banane, par exemple, consomme une très grande quantité de potassium, le cacaoyer et le caféier, le tabac et le cotonnier, de potassium et de phosphore. L'arachide ne fructifie pas sans calcium, la canne à sucre se distingue par un grand besoin d'azote. Le manioc qui consomme beaucoup de phosphore, de potassium et de calcium est une des cultures tropicales les plus exigeantes en éléments nutritifs. Dans une certaine mesure, on peut juger des besoins des cultures tropicales en alimentation d'après le prélèvement par elles des éléments nutritifs (tableau 52).

Les différentes cultures se distinguent par une adaptabilité différente à la réaction du sol. Pour la plupart des plantes cultivées, elle se trouve dans des limites de pH de 5,0 à 6,5 (tableau 53).

Les jeunes sols hydromicacés sont caractérisés par des valeurs de pH proches de la neutralité, un grand pouvoir absorbant et un degré élevé de saturation par les bases dans toutes les zones climatiques, même sous l'équateur. Ce fait concerne également les sols montmorillonitiques compacts des zones arides. Un bas niveau de saturation par des bases est propre aux sols noirs allitiques d'altitude, bien qu'ils soient souvent formés sur une écorce hydromicacée par érosion éolienne.

Dans les sols tropicaux, le cycle de l'azote a ses particularités.

Les sols de l'Afrique tropicale, surtout forestiers, ont une teneur élevée en bactéries ammonifiantes et une teneur basse en bactéries nitrifiantes et fixatrices de l'azote. Ceci provoque des pertes d'azote entraîné par les pluies et un dégagement d'ammoniac libre dans

Tableau 52

Exportation des éléments nutritifs par les cultures tropicales
(d'après Jacob et Uexküll)

Culture	Récolte sur 1 ha	Exportation kg/ha		
		N	P	K
Blé	1600 kg grain + 2800 kg paille	54	22	45
Orge	1900 kg grain + 2800 kg paille	48	24	43
Riz	3500 kg grain + 2400 kg paille	58	18	67
Maïs	3500 kg grain + 6000 kg paille	114	43	125
Soja	1600 kg grain	112	26	34
Fèves	1800 kg grain + 3200 kg paille	132	37	97
Luzerne	6400 kg foin	192	49	134
Patate douce	6000 kg tubercules	62	18	98
Manioc	14000 kg tubercules	54	45	232
Betterave sucrière	14000 kg racines + 4000 kg fanes	112	28	170
Cotonnier	3500 kg fibre + 800 kg graines	75	30	78
Tabac	1600 kg	116	36	214
Banane	4800 kg fruits	56	14	185
Vigne	8000 kg grappes	71	27	89
Arachide	1400 kg graines	80	38	54

Tableau 53

pH optimaux du sol pour différentes cultures
(d'après Jacob et Uexküll)

Culture	pH du sol	Culture	pH du sol
Orge	6,5-8,0	Tabac	5,5-7,5
Maïs	5,5-7,5	Banane	6,0-7,5
Riz	5,0-6,5	Trèfle d'Alexandrie	6,0-7,5
Blé	6,0-7,5	Arachide	5,3-6,6
Betterave sucrière	6,5-8,0	Luzerne	6,2-7,8
Cotonnier	5,0-6,0	Soja	6,0-7,0
Kenaf	6,0-7,0	Sorgho	5,5-6,5
Pomme de terre	5,8-6,0	Millet	5,0-6,5
Canne à sucre	6,0-8,0	Patate douce	5,8-6,0

l'atmosphère. Des conditions plus favorables aux bactéries nitrifiantes existent dans les sols cultivés ainsi que dans les sols montmorillonitiques compacts noirs. Notons que l'activité des bactéries fixatrices d'azote dans les sols de l'Afrique tropicale est habituellement réprimée par une insuffisance de calcium.

Dans les zones à saison sèche prolongée, l'activité des bactéries du sol baisse fortement. Cependant, le processus d'humification se poursuit grâce à l'activité des actinomycètes insensibles à la sécheresse.

Dans la forêt tropicale, la savane ou sous jachère le sol est constamment protégé des rayons solaires par la végétation. Dans ces conditions, les nitrates qui se déplacent librement dans la solution du sol sont saisis par les racines des plantes et les pertes d'azote à partir du sol sont ramenées au minimum. L'azote s'accumulant lentement circule dans un cycle fermé : sol-plante-chute-sol.

Les brûlis pratiqués en Afrique pour préparer la terre à la culture en champ et en plantation font perdre beaucoup d'azote gazeux ou entraîné du sol végétal par les pluies sous la forme de composés très solubles.

Le soufre suit des transformations analogues au cycle de l'azote. Un rôle important est également joué par les micro-organismes participant à la transformation des composés soufrés de la partie organique du sol en formes facilement assimilables par les plantes. Le soufre est nécessaire à la croissance et au développement des plantes, mais pas en aussi grande quantité que l'azote. Dans le sol, le soufre se rencontre principalement sous la forme de composés organiques.

Le cycle du phosphore revêt un autre caractère. Les sels hydrosolubles de l'acide orthophosphorique (H_3PO_4) sont la source essentielle de l'alimentation des plantes. Elles utilisent en moindre quantité les sels des acides méta et pyrophosphoriques, les composés organiques du phosphore du sol et les débris végétaux.

La partie prédominante du phosphore se trouve dans l'humus sous forme de phytines, de phosphatides, de nucléoprotéides et d'autres constituants des débris végétaux et des organismes microbiens. Tous ces composés sont difficilement assimilés par les plantes. Le phosphore minéral du sol est représenté par différentes formes d'apatites et de phosphates, de sesquioxydes de fer et d'aluminium. Tous ces composés sont peu solubles dans l'eau.

Les micro-organismes du sol sont capables de transformer les formes inaccessibles du phosphore, ses composés organiques y compris, en formes aisément assimilables. La faculté qu'ont les plantes d'assimiler le phosphore à partir de ses composés varie fortement suivant leur espèce. Cependant, la plupart des cultures agricoles tropicales utilisent surtout les composés de l'acide orthophosphorique qui ne se rencontre pas à l'état libre dans le sol mais forme différents sels avec le calcium, l'aluminium et le fer. Cet acide est précipité par le calcium sous forme de phosphate de calcium insoluble dans l'eau. Sous les tropiques, un rôle analogue est joué par le sesquioxyde de fer. Les plantes utilisent surtout les phosphates bisubstitués de calcium et de magnésium ($CaHPO_4$ et $MgHPO_4$) moins solubles dans l'eau par rapport aux phosphates monosubstitués de l'acide orthophosphorique que l'on ne trouve pas en grande quantité dans les sols. La réaction acide favorise la dissolution et l'assimilation des phosphates peu solubles de calcium et de magnésium ; c'est le contraire qui se produit quand la réaction du milieu est alcaline.

En ce qui concerne le régime alimentaire des plantes tropicales, c'est la teneur élevée des sols, surtout des chromosols, en sesquioxy-

des de fer et d'aluminium qui importe. Ces composés fixent les anions de l'acide phosphorique et les font passer à une forme peu accessible. La fixation de l'anion de l'acide phosphorique est particulièrement intense dans l'interaction avec Fe_2O_3.

Dans les sols tropicaux, le phosphore est un élément plus déficient que le potassium. On sait qu'il est impossible de remédier aux conséquences d'une carence en phosphore des plantes cultivées. Il est donc naturel qu'un retard dans l'apport d'engrais fasse baisser la récolte et diminuer sa qualité.

Souvent, le phosphore est en quantité insuffisante dans les vieux sols kaolinitiques de l'Afrique. Dans les chromosols l'assimilation du phosphore par les plantes est entravée par une teneur élevée en sesquioxydes de fer, alors que dans les sols montmorillonitiques compacts et dans les sols arides elle l'est par leur réaction neutre ou alcaline. Dans les jeunes sols hydromicacés l'insuffisance de phosphore est le moins prononcée et, par conséquent, son apport n'est pas tellement nécessaire.

On n'est pas unanime sur l'influence exercée par la combustion des débris végétaux sur l'assimilabilité des composés du phosphore pour les plantes. Certains chercheurs estiment que lorsque les débris végétaux sont brûlés, la quantité de phosphore assimilable du sol diminue jusqu'à un niveau de carence ; d'autres arrivent à la conclusion directement opposée.

Un important élément de l'alimentation des plantes est le potassium. Beaucoup de cultures tropicales en prélèvent du sol une grande quantité. Pour obtenir de bonnes récoltes, il est nécessaire d'épandre des engrais potassiques à assez fortes doses, car le potassium est relativement mobile dans les sols ayant une petite capacité d'adsorption et il se trouve entraîné par les pluies.

Dans le sol, le potassium est représenté par des sels hydrosolubles facilement assimilés sous la forme d'un cation adsorbé par les colloïdes. Cette forme du potassium est la principale source d'alimentation des plantes. Le potassium entrant dans la composition des silicates et des alumosilicates (orthoclase, microcline, micas, glauconite, etc.) est moins assimilable. La majeure partie du potassium se trouve dans le sol sous la forme de minéraux et, sous un climat tempéré, elle n'est pas accessible aux plantes. C'est ainsi que sur les jeunes sols hydromicacés du Congo central enrichis par les produits de l'érosion de l'orthoclase, le caféier de l'Arabie répond faiblement à un apport d'engrais potassiques. Sur les chromosols arrivés à maturité qui se trouvent souvent à proximité de ces jeunes sols hydromicacés, il en est tout à fait autrement.

Dans les sols tropicaux, la teneur en potassium croît à mesure qu'augmente l'aridité et que diminue l'acidité du sol. Les sols équatoriaux renferment très peu de potassium. Il se trouve en quantité suffisante pour l'alimentation des plantes dans les sols des zones subaride et aride, dans les montmorillonites noirs compacts et les jeunes sols hydromicacés des tropiques.

La brûlure des débris végétaux entraîne la minéralisation d'une importante quantité de potassium qui est ensuite presque entièrement lessivé par les pluies.

Le calcium, le magnésium et le fer ont aussi une grande importance pour l'alimentation des plantes. En tant qu'éléments nutritifs, ils sont utilisés sous forme de cations qui se trouvent dans le sol à l'état adsorbé, dans les débris organiques ou à l'état dissocié dans la solution du sol.

Sous les tropiques, beaucoup de ces éléments, le calcium et le magnésium, par exemple, sont fortement lessivés du sol. Dans les zones humides et suffisamment arrosées, il faut donc les apporter sous forme d'engrais.

Dans la zone équatoriale de l'Afrique, la combustion des débris organiques entraîne la minéralisation d'environ 105 kg de potassium, 75 kg de magnésium, 290 kg de calcium par hectare. Une bonne part de ces éléments, surtout le potassium, est entraînée par les pluies loin du sol végétal.

La déficience en potassium, calcium, magnésium dans le sol est plus prononcée sous l'équateur, dans les zones humides et assez humides, et moins sur les jeunes sols hydromicacés.

Les sols tropicaux subissent souvent une pénurie d'oligo-éléments. En Afrique, ce sont surtout le bore et le soufre qui manquent, fait fréquent dans les sols anciens et mûrs qui se sont constitués sur le matériel éolien des écorces déplacées par l'érosion ou sur la tourbe des marais oligotropes.

On ne saurait craindre une insuffisance d'oligo-éléments dans les jeunes sols hydromicacés et dans les sols des zones arides. Les tropiques se caractérisent surtout par l'accumulation par beaucoup de plantes de silicium et d'aluminium, qui ne sont pas des éléments majeurs pour l'alimentation des végétaux.

Une forte pluviométrie et une température moyenne élevée au cours de l'année accélèrent l'érosion des roches-mères et la décomposition des végétaux tombés. Dans la zone équatoriale, ce processus se poursuit toute l'année. Le lessivage des éléments nutritifs dissous le fait aussi et atteint un maximum d'intensité. Si bien que, dans la solution du sol des terres tropicales, il ne reste qu'une petite quantité d'éléments nutritifs accessibles aux plantes.

A mesure qu'on s'éloigne de l'équateur et qu'augmente la durée de la saison sèche, l'arrivée d'éléments fertilisants dans le sol et le processus parallèle de leur lessivage vont en diminuant. L'alternance de périodes d'humidification et de dessèchement influe sur l'assimilation des éléments nutritifs, surtout du phosphore et du potassium, par les plantes. Dans les zones où la saison sèche est nettement prononcée, il faut, en agriculture, tenir compte des variations saisonnières d'intensité des processus microbiens conditionnant l'assimilabilité des principaux éléments nutritifs des plantes. Malheureusement, tous ces problèmes agrochimiques de première importance sont encore insuffisamment étudiés.

La plupart des sols tropicaux sont pauvres en phosphore, potassium, calcium, magnésium, oligo-éléments et renferment peu de composés azotés assimilables. Seuls les jeunes sols hydromicacés et les montmorillonites compacts des tropiques renferment suffisamment d'éléments fertilisants.

C'est l'horizon humique du sol qui détient les principales réserves d'éléments nutritifs. Les sols tropicaux accumulent relativement peu d'humus. Font exception les jeunes sols hydromicacés, les ferralites de la zone suffisamment humide. L'humus est détruit par le brûlis des débris végétaux pratiqué en Afrique dans la zone forestière et dans la savane.

Un des facteurs décisifs pour élever la fertilité des sols et, par là même, le régime alimentaire des plantes et le rendement des cultures, est l'emploi d'engrais.

Les pays d'Afrique occidentale sont parmi les plus arriérés quant à la quantité d'engrais épandus. De plus, la plupart des engrais sont employés dans les fermes des Européens, les exploitations de l'Etat et les instituts d'essais. Non seulement les engrais minéraux, mais aussi les engrais organiques, fumier, composts, tourteaux, etc., sont rares chez les paysans de la région. Or, l'emploi de ces engrais améliore le régime hydrique et la structure des sols tropicaux, y favorise l'accumulation de l'humus et, enfin, contribue à une meilleure utilisation des substances nutritives par les plantes.

Sous les tropiques, le fumier est plus efficace que la sidération, étant donné que son épandage enrichit le sol non seulement en matière organique, mais aussi en microflore utile. L'engrais vert est moins efficace du fait que l'enfouissement du recouvrement herbacé, surtout dans les bas-fonds, provoque dans les sols l'accumulation de fortes quantités d'acides organiques, en particulier d'acide acétique, qui détériorent le système radiculaire des céréales et font ainsi baisser les récoltes. Pour éviter l'effet néfaste de l'enfouissement de l'engrais vert sur la croissance des plantes et la quantité récoltée il faut apporter au sol des engrais azotés.

Une des causes de l'usage insuffisant de la fumure est le pâturage des animaux, de même que l'absence de l'élevage dans les régions où sévit la mouche tsé-tsé, par exemple. L'absence de système d'entretien des bovins fait qu'on n'obtient là qu'une quantité annuelle de 300 à 400 kg de fumier par tête, alors que dans la zone soudanaise on peut en obtenir 3 ou 4 tonnes et dans la zone guinéenne, jusqu'à 10 tonnes.

Le fumier cède donc sa place de choix à la sidération: pois du Brésil, crotalaria, canavalia, pois pigeon et autres cultures. L'enfouissement de l'engrais vert augmente l'humidité des sols tropicaux (de 30 %), leur teneur en humus (de 30 %), améliore leur structure et l'utilisation par les plantes des engrais minéraux, permet de mécaniser le travail du sol sans un effet néfaste tant soit peu notable sur ses propriétés hydrophysiques et d'obtenir de meilleures récoltes.

De nombreuses recherches ont montré que les engrais minéraux étaient plus efficaces sur un arrière-fond de sidération et l'étaient moins sur les friches non brûlées ou brûlées.

Sous les tropiques, l'emploi systématique des engrais minéraux fait augmenter les récoltes d'arachide de 30 à 50 %, de sorgho et de mil africain de 40 à 60 %, de riz de 100 %. Grâce à une meilleure agriculture et à un bon usage systématique d'engrais minéraux et organiques le rendement du sorgho en Afrique peut être quintuplé.

Dans les pays d'Afrique occidentale les normes de fumure sont assez basses. En culture sèche, sous les céréales et le cotonnier on n'utilise pas plus de 15-20 tonnes de fumier ou 100-150 kg d'engrais minéraux par hectare. Ce n'est qu'en culture irriguée sous les légumes, la pomme de terre, le riz et le coton que les normes de fumure sont un peu plus élevées.

Sous le sorgho et le mil africain il est recommandé (Sénégal) d'épandre 30 kg/ha d'azote avant les semis ou 20 kg/ha avant le premier sarclage et après le démariage. L'apport de 30 kg/ha d'azote dans les essais assurait une augmentation de la récolte de grain de mil africain de 50 %.

Au Ghana, on apporte en moyenne au riz 22,4 kg/ha de NPK. En même temps, les expériences en champ montrent qu'il est plus efficace d'apporter ici une quantité double de ces éléments nutritifs. Avec une dose double d'engrais, la récolte de grain de riz fait plus que doubler pour atteindre 13,8 à 30,9 q/ha.

Sous les tropiques, l'efficacité des engrais minéraux augmente lorsque les plantes sont suffisamment pourvues d'eau. Les expériences faites sur les terres irriguées de la ferme d'Etat « Office du Niger » (Mali) ont montré que, dans ces conditions, on peut obtenir des récoltes de riz de 40-50 q/ha en apportant 40 à 60 kg d'azote et 30 à 40 kg de P_2O_5 par hectare. Or, sans fumure, la récolte de grain n'est que de 20 à 25 q/ha.

La matière organique, surtout sous les tropiques humides, se décompose très vite, les engrais minéraux non utilisés par les plantes sont entraînés par les pluies dans les horizons inférieurs du sol. Sous les tropiques, le posteffet des engrais est donc moins grand que dans la zone tempérée. Cependant, si on les apporte annuellement, ils augmentent la fertilité des sols tropicaux et le rendement des récoltes. Au Sénégal, par exemple, l'emploi d'engrais pendant près de 20 ans à Sine-Saloum sur de vastes espaces a assuré la croissance des récoltes d'arachide de 13,3 à 18,5 q/ha.

Sous les tropiques, il vaut mieux épandre le fumier sous labour juste avant les semis.

En Afrique occidentale, les engrais sont surtout utilisés en fumure d'appoint. La fumure n'y est donnée qu'une seule fois et souvent au moment où les plantes du mil africain ou du sorgho atteignent déjà un mètre de haut et plus et que le riz se trouve à la phase de l'épiaison.

Etant donné qu'en Afrique occidentale le tallage du mil africain

et du sorgho commence le 10e ou 13e jour et dure jusqu'à 35-40 jours après l'apparition des jeunes pousses, le mieux, pour ces cultures, est d'épandre les engrais azotés au début de la phase du tallage. Des fumures d'appoint favorisent à cette période un plus fort tallage des plantes et un accroissement des récoltes.

Le changement au cours de l'année des conditions de croissance et de développement des plantes sous les tropiques modifie leur réponse aux engrais. Etant donné le grand nombre des journées nuageuses, l'intensité de l'insolation est plus basse dans la saison humide que dans la saison sèche. Dans la saison humide un apport fractionné d'engrais est efficace: la moitié de la dose d'azote à la phase du tallage et l'autre à celle de l'épiaison. Dans les recherches effectuées à la station d'essais de Kogoni (Mali) la récolte de grain de riz était, quand on donnait toute la dose d'azote avant le semis, de 43,3 q/ha et à la phase du tallage, de 41,8 q/ha; quand on donnait par demi-doses au tallage et à l'épiaison, de 51,1 q/ha.

A la saison sèche, une plus grande intensité de l'insolation et de la radiation ondes courtes grâce à un ciel sans nuages et à une moins forte humidité de l'air favorisent une croissance et un développement plus rapides des plantes qui manifestent alors un plus grand besoin d'azote et d'autres éléments nutritifs à une période plus précoce. C'est pourquoi, dans ces conditions, on obtient une meilleure récolte de riz inondé en épandant toute la dose d'azote avant le semis.

En l'absence ou en insuffisance d'engrais, les sols tropicaux étant fortement lessivés, on est souvent obligé de mettre en valeur de nouvelles friches et terres vierges. Le choix d'un nouveau terrain plus fertile se fait à la base des indices de l'intensité de la croissance des plantes, de la composition du recouvrement végétal naturel, du caractère du relief, etc. Dans les zones équatoriale et tropicale, par exemple, l'indicateur du rétablissement de la fertilité du sol est une bonne croissance d'une ombellifère: *Musanda coctopoides.*

CULTURES MARCHANDES

Le cacaoyer

L'Afrique occidentale est le principal fournisseur de fèves de cacao, l'Amérique latine vient en second pour la production et l'exportation de ce produit. Les principaux producteurs et fournisseurs de fèves de cacao en Afrique occidentale sont le Ghana, le Nigeria, la Côte d'Ivoire et le Cameroun.

Le cacaoyer a un système radiculaire peu profond. Environ 80 % des racines de la plante se trouvent dans la couche superficielle du sol sur une épaisseur de 15 cm. Le travail de la terre peut donc les détériorer.

Le pH optimal du sol pour la culture du cacaoyer est environ 6,5. Les sols d'un pH inférieur à 5,5 conviennent peu. Un pH élevé peut provoquer la chlorose par suite de l'insuffisance de fer acces-

sible et des anomalies dans le développement des feuilles par pénurie de zinc et de cuivre assimilables.

Les sols ocrés, latosols d'un brun rouge, formés dans les conditions d'une pluviométrie de 1000-2000 mm par an, sont de bons sols pour la culture du cacaoyer. Ces terres lui sont très favorables, leur réaction va de la neutralité à une acidité modérée et elles renferment une quantité relativement importante de potassium et de magnésium échangeables. Les oxysols, latosols rouges et jaunes à forte acidité par lessivage intense dans les conditions d'une pluviométrie élevée ne conviennent guère au cacaoyer. Par conséquent, leur alcalinité estimée d'après la quantité de calcium, magnésium et potassium échangeables est de beaucoup inférieure à celle des sols ocrés.

Selon Smith, les sols convenant à la culture du cacaoyer doivent répondre aux exigences suivantes: 1) une capacité d'échange des bases dans l'horizon superficiel non inférieure à 12 mEq pour 100 g de sol et non inférieure à 5 mEq pour 100 g de sol dans les horizons du sous-sol; 2) une teneur moyenne de matière organique dans la couche supérieure du profil de 0-15 cm non inférieure à 3,0 % (1,75 % de carbone organique); 3) une saturation en bases dans les horizons sous-superficiels non inférieure à 35 % (si la capacité d'échange des bases n'est pas trop élevée); 4) un pH au niveau de 5,0-7,5 dans les horizons superficiels et l'absence d'une forte acidité (pH $<$ 4) ou alcalinité (pH $>$ 8,0) dans les horizons jusqu'à 1 m de la surface du sol; 5) des niveaux de diverses bases échangeables dans une couche de 0 à 15 cm: pour le calcium, non inférieur à 8 mEq pour 100 g de sol; pour le magnésium, non inférieur à 2 mEq pour 100 g de sol; pour le potassium, non inférieur à 0,24 mEq pour 100 g de sol. En outre, le rapport des niveaux de calcium et de magnésium échangea-, les dans les 15 cm superficiels du sol ne doit pas être supérieur à 4,0 et celui de la somme du calcium et du magnésium au potassium, non inférieur à 25. Un excès de potassium par rapport au magnésium dans les sols destinés à la culture du cacaoyer est indésirable.

Dans les conditions présentées par le Ghana, la récolte de fèves de cacao est en corrélation étroite avec la teneur en éléments nutritifs dans les 0-15 cm superficiels du sol. Il a été remarqué que les sols forestiers du Ghana se distinguent par de bas indices de phosphore accessible.

Les principales conditions d'une réponse suffisante du cacaoyer à la fumure sont non seulement un bon état physique du sol et un ombrage bien choisi, mais aussi l'emploi de plantes hautement productives.

Le potentiel génétique de plantes à haut rendement ne peut cependant être entièrement réalisé que dans des conditions de milieu favorables, y compris un abondant approvisionnement en éléments nutritifs.

Autrefois, des formes de cacaoyers à bas rendement n'utilisaient pas entièrement, sous ombrage, les réserves d'éléments nutritifs du sol. Cependant, les variétés à haut rendement peuvent épuiser ra-

pidement ces réserves si l'on ne prend des précautions. Sans apport d'engrais, il serait illusoire de maintenir plus de quelques années des formes puissantes de cacaoyers sous un bon éclairage, même sur les terres les plus fertiles.

Actuellement, la majeure partie des plantations de cacaoyers reste entretenue sous ombrage. Les arbres à couvert épais exercent une action favorable sur le sol et les plantes. Ils protègent les plantes contre le dommage causé par les rayons directs du soleil et réduisent au minimum l'éventualité de brûlures des feuilles en créant un écoclimat assez stable par diminution de l'intensité de l'éclairage, du mouvement de l'air et des variations de température. En outre, ils aident à conserver le sol en lui fournissant de la matière organique et en le protégeant contre l'action destructrice de la lumière solaire et de la pluie, provoquant très vite des pertes de matière organique et donc la destruction du recouvrement du sol.

Cependant, l'ombrage fait diminuer l'intensité du métabolisme et de la croissance, réduit la floraison et la productivité. La nécessité d'un ombrage doit être déterminée à partir des conditions locales, étant donné que le degré d'ombrage donné est étroitement lié aux particularités climatiques de l'endroit, aux propriétés physiques et à la fertilité du sol. Evans et Murray ont nettement démontré l'influence marquée de l'intensité de l'éclairage sur la croissance et le rendement, ainsi que sur l'interaction entre l'éclairage et l'alimentation du cacaoyer. L'éclairage optimal au début de la croissance sans apport d'engrais était de 50 % de l'insolation complète. Avec une insolation moindre, la croissance se trouvait ralentie et les engrais, moins efficaces. Avec un éclairage intense, la croissance se ralentissait en l'absence d'azote, mais les arbustes ayant reçu des engrais azotés poussaient avec plus d'intensité que les meilleurs spécimens ne recevant qu'un éclairage de 50 %. Le gain de récolte obtenu grâce à l'apport d'engrais azotés augmentait avec l'intensité de l'éclairage. On ne constate un accroissement notable de la récolte par l'apport d'engrais potassiques qu'avec un éclairage solaire intense.

La récolte des jeunes cacaoyers est une fonction linéaire du logarithme d'intensité de la lumière, mais cette dépendance est également fonction de l'accessibilité des substances nutritives. Sur les sols à faible teneur en substances nutritives assimilables, un ombrage permanent est nécessaire. Sous la protection de l'ombre, le besoin du cacaoyer en substances nutritives est de beaucoup inférieur, étant donné la plus faible intensité de la photosynthèse. Ainsi, l'ombrage favorise l'obtention d'une récolte de cacaoyer sur les sols relativement peu productifs, car il protège l'arbuste contre l'action néfaste des brusques variations de facteurs climatiques.

Sur les sols plus fertiles, on peut diminuer l'ombrage et sur les sols très riches en éléments fertilisants, le cacaoyer peut pousser sans ombrage. Mais la culture du cacaoyer sans ombrage rend obligatoire l'apport d'engrais. On a constaté dans beaucoup de pays cette étroite dépendance entre l'intensité de l'éclairage et l'alimentation.

A Trinidad, par exemple, l'apport d'azote (100 kg/ha) sous le cacaoyer clairsemé et sans ombre donnait un fort accroissement de récolte, 6 kg de fèves sèches pour 1 kg d'azote. Après la période initiale de croissance sans ombre, le besoin du cacaoyer en azote est partiellement compensé par le propre ombrage de l'arbuste croissant, tandis que le besoin en potassium augmente. Les expériences de fumure effectuées à l'Institut de recherche d'Afrique occidentale sur le cacaoyer ont également révélé une forte augmentation de la récolte sur les terrains sans ombre et une réaction plus faible à l'apport d'engrais sous ombrage. La suppression de l'ombrage produisait un effet très marqué et l'apport d'engrais aux arbustes en l'absence d'ombrage accroissait encore plus la récolte, fait dû à un effet favorable de lumière et d'engrais. Sans ombrage avec fumure et mulching les jeunes arbustes de la variété *Amazon* produisait 224 kg/ha de fèves de cacao sèches la seconde année de la plantation et environ 2240 kg/ha la quatrième année.

La suppression de l'ombrage et l'apport d'engrais font non seulement augmenter la récolte, mais assurent également une fructification plus hâtive. En Afrique occidentale, l'effet de la fumure en l'absence d'ombrage s'exprime par une augmentation de récolte atteignant 3500 kg/ha de produit sec.

Actuellement, il est généralement admis qu'une plus grande récolte est obtenue en l'absence d'ombrage permanent. Mais cela n'est possible qu'à certaines conditions: la couche du sol doit être assez profonde pour assurer un bon développement du système radiculaire et doit posséder de bonnes propriétés physiques, les engrais doivent être apportés à des doses suffisamment fortes, il faut aussi soigneusement contrôler l'adventicité, les parasites, les maladies.

Un cacaoyer arrivé à maturité peut se passer d'ombrage, mais depuis sa formation (3-5 ans) jusqu'au moment où les couronnes de la plantation se rejoignent et que les arbustes se donnent eux-mêmes de l'ombre, un ombrage provisoire par des bananiers, des buissons de la famille des légumineuses ou d'autres plantes à croissance rapide est généralement nécessaire.

Si le sol est en mauvais état et l'humidité insuffisante, un ombrage permanent devient nécessaire bien que cela entraîne la diminution de la récolte.

Le mulching est un autre procédé important pour entretenir la fertilité du sol, surtout pour les arbustes non ombragés, si l'on peut le réaliser à peu de frais. Le mulching réprime la croissance des mauvaises herbes, réduit l'échauffement du sol, l'évaporation, la transpiration, protège le sol contre l'érosion et la détérioration de la structure. Il améliore les propriétés physiques du sol, exerce une action favorable sur l'assimilation du phosphore par les plantes et leur procure de précieux éléments nutritifs.

Les symptômes de la déficience d'éléments nutritifs chez le cacaoyer sont assez bien connus. On sait que son besoin d'azote est en corrélation plus ou moins inverse avec l'ombrage. Si le cacaoyer est très

ombragé, sa réaction à l'azote est généralement basse. Toutefois, quand il pousse sous un ombrage léger ou sans ombre, il a besoin d'un supplément d'azote pour former de bonnes récoltes. Les plantes clairsemées et sans ombrage ou peu ombragées ont surtout un grand besoin d'azote.

Le besoin du cacaoyer en phosphore et potassium doit être déterminé par une analyse du sol et (ou) des feuilles. En même temps, il est connu qu'une bonne partie des sols plantés de cacaoyers ont besoin de phosphore. La déficience de potassium est moins courante, mais son besoin est grand pour les arbres à grand rendement. La déficience de potassium s'observe sur les sols à teneur normale en cet élément, mais très riches en même temps en calcium et magnésium.

Le besoin d'engrais peut être déterminé d'après des symptômes, constatés *de visu*, de l'insuffisance d'éléments nutritifs, dans des expériences sur des engrais et d'après les résultats de l'analyse du sol et des feuilles.

La déficience d'azote se manifeste par un virage de la couleur des feuilles du vert au vert pâle et à diverses nuances de jaune, par une diminution des dimensions des feuilles et l'apparition d'une nécrose. La déficience d'azote est un fait habituel pour les plantations sans ombrage et en présence d'une forte adventicité.

La déficience de phosphore est cause d'une coloration bronzée des bords des limbes et des pointes des jeunes feuilles, coloration qui se change souvent en nécrose. Sur les plantations, il est souvent difficile de faire le diagnostic de la déficience de phosphore. Cette carence peut provoquer la mort du bois des arbustes.

La déficience de potassium se manifeste par une coloration orangée des bords des vieilles feuilles qui passe par la suite à une nécrose marginale. Une forte insuffisance de potassium peut provoquer une chute abondante des feuilles. Avant de tomber, les feuilles deviennent jaune orangé.

L'insuffisance de magnésium provoque, entre les nervures, une chlorose qui se propage de la nervure centrale aux bords du limbe, contrairement à l'insuffisance de calcium dans laquelle la chlorose se propage des bords du limbe vers son milieu. En outre, dans l'insuffisance de calcium ce sont avant tout les feuilles de l'extrémité des rameaux qui souffrent et dans l'insuffisance de magnésium, ces feuilles restent justement intactes.

La déficience de zinc a été relevée sur la Côte d'Ivoire, au Ghana, au Zaïre. Les symptômes de l'insuffisance de zinc consistent principalement dans des anomalies morphologiques de la feuille, telles que, par exemple, la feuille falciforme, la feuille longue et étroite qui se tord parfois. Les anomalies sont plus nombreuses à chaque rameau suivant. Le moyen le plus rapide pour mettre fin à l'insuffisance de zinc est de pulvériser avec un mélange de sulfate de zinc et de chaux (300 g de sulfate de zinc et 150 g de chaux pour 100 l d'eau). La pulvérisation devra être faite au moment de la formation des premiers rameaux et, s'il le faut, on la répétera.

La déficience de bore provoque un drageonnage abondant, une floraison sans fécondation. Le point végétatif vient souvent à mourir, des tiges creuses se développent, le processus se répète, ce qui conduit à la formation de touffes épaisses de drageons, à la chute prématurée des feuilles et à la mort de la plante. Au Ghana, on a découvert, par exemple, qu'en insuffisance de bore une grande partie des fruits verts ou mûrs présentent une forme irrégulière et sont souvent stériles. En outre les parties normalement développées de la cosse avec graines avaient un cœur ligneux, dur, de couleur brune. Le plus souvent, les fruits fécondés étaient sans graines, vides et plus petits. Pour prévenir l'insuffisance de bore, le plus simple est d'utiliser le silicate de bore, car on peut l'employer en réserve à fortes doses sans danger de surdosage.

Les expériences en champ sont la meilleure méthode pour déterminer les besoins du cacayer en engrais. Mais cette méthode exige beaucoup de temps, doit être soigneusement planifiée et demande de grandes surfaces de plantations de même espèce. En outre, les résultats obtenus par cette méthode pour un endroit ne seront appliqués à un autre qu'avec beaucoup de circonspection.

L'analyse du sol ne peut donner qu'une réponse partielle à la question de savoir s'il est nécessaire de recourir à des engrais pour le cacayer. Elle ne donne qu'une idée d'ensemble de la teneur du sol en éléments et est souvent loin d'être suffisante pour caractériser l'assimilabilité de ces éléments ou la quantité que les plantes peuvent en absorber.

L'analyse foliaire suppose l'utilisation de la plante même en qualité d'indicateur de ce qu'elle reçoit du sol. La principale difficulté de cette analyse est que la teneur de la plante en éléments nutritifs subit l'influence, non seulement du ravitaillement en ces éléments, mais aussi de l'âge de la plante même et de l'intensité de l'éclairage. Cependant, en cas de déficience marquée d'éléments nutritifs, leur faible teneur dans les feuilles laisse de côté tous les détails de la méthode de prise de l'essai et indique le genre d'engrais nécessaire pour couvrir la déficience.

En étudiant les différentes limites que présente la méthode d'analyse foliaire, Murray a établi les niveaux normal, bas et déficitaire de la teneur des jeunes feuilles de cacayer en éléments nutritifs (tableau 54).

Pour ce qui est de l'azote Wessel a découvert qu'une basse teneur d'azote dans les jeunes feuilles ($<$1,80 %) s'accompagnait d'une vive réaction du cacayer à l'apport d'engrais azoté; une teneur entre 1,80 et 2 %, d'une réaction faible ou nulle. Pour pronostiquer les besoins en azote, il faut tenir compte, non seulement de la concentration de l'élément, mais aussi du bilan de l'azote et du phosphore. Dans les jeunes feuilles se développant normalement le rapport N:P est ordinairement de 10 à 11. Cependant, on peut trouver le même rapport dans les feuilles de plantes ayant un besoin identique d'azote et de phosphore. Un rapport N:P $<$ 10 témoigne générale-

Divers niveaux de teneur en éléments nutritifs des jeunes feuilles de cacaoyer

Elément nutritif	Niveau de teneur en élément nutritif (en % de matière sèche)		
	normal	bas	déficitaire
N	>2,0	1,80-2,0	<1,80
P	>0,20	0,13-0,20	<0,13
K	>2,0	1,20-2,0	<1,2
Ca	>0,40	0,30-0,40	<0,3
Mg	>0,45	0,20-0,45	<0,20

ment d'une insuffisance d'azote, alors qu'un rapport >11, d'une insuffisance de phosphore.

Recommandations et pratique de l'emploi d'engrais. Au Ghana, le cacaoyer tire sous ombrage suffisamment d'azote du sol. Ici, un apport annuel au sol de 45 à 90 kg de P_2O_5 à l'hectare (sous forme de superphosphate triple) est utile au début de la saison des pluies, en avril ou en mai. Mais avec un ombrage plus faible, les variétés de cacaoyer à grand rendement peuvent exiger davantage d'azote. Dans les cas où la diminution ou la suppression de l'ombrage et l'apport d'azote et de phosphore font croître considérablement la récolte, les réserves de potassium dans le sol peuvent ne pas suffire pour obtenir une bonne récolte et il faut alors procéder à un apport complémentaire. On n'oubliera pas, dans ce cas, de tenir compte du besoin possible de magnésium.

Au Nigeria, les sols argileux à flanc de coteau conviennent le mieux à la culture du cacaoyer. Généralement, ces sols sont plus riches en éléments nutritifs et en matière organique que les sols sablonneux. Ici, la récolte de fèves de cacao est fortement limitée par une teneur insuffisante du sol en phosphore. Un autre besoin important, celui d'azote, est probablement dû à ce qu'au Nigeria le cacaoyer est cultivé sous un faible ombrage ou même sans celui-ci. Les jeunes arbustes plantés sur des terres déboisées exigent un apport supplémentaire d'azote. Dans un sol forestier, il y a suffisamment de phosphore, mais on doit le maintenir à ce niveau par un apport d'engrais phosphatés au moment où les arbustes se mettent à fructifier. Si les plantations sont débarrassées des vieux cacaoyers ou d'autres cultures, les réserves de phosphore sont ordinairement épuisées et les jeunes plantes exigent aussi bien du phosphore que de l'azote.

A l'exception des sols sédimentaires pauvres en potassium échangeable et total et de certains sols sablonneux sur roches métamorphi-

ques où la teneur en potassium ne suffit pas pour assurer les besoins du cacaoyer, surtout cultivé sans ombrage, il n'est pas nécessaire, au Nigeria, d'apporter du potassium à cette culture. Etant donnée l'action positive exercée par le magnésium dans certaines régions, il est évident qu'on puisse recommander d'apporter du magnésium en plus de potassium là où cela est nécessaire.

Au Nigeria, on recommandera d'épandre sous le cacaoyer un engrais azoté et phosphaté complexe de composition 20-20-0,25-20-0 ou 25-15-0 sur les sols formés sur roches métamorphiques et un engrais ternaire azoté-phosphaté-potassique de composition 15-15-15 sur les sols formés sur roches sédimentaires. La dose d'engrais correspondant calculée par arbuste augmente de 56 g l'année de la plantation à 112 g la 4e année. De la 4e à la 6e année qui suit la plantation, la dose d'engrais devra être de 250 kg et par la suite, de 375 kg/ha par année.

Pour la Côte d'Ivoire, où l'on observe souvent une déficience de phosphore et de potassium, on recommandera les doses d'engrais suivantes: sur les sols où le potassium est insuffisant 60, 50 à 60 et 100 à 120 g de N, P_2O_5 et K_2O respectivement pour un arbuste; sur les sols formés sur roches granitiques-gneissiques 60, 80 et 60 à 80 g; sur les sols formés sur roches cristallines 60, 50 à 60 et 60 à 80 g de N, P_2O_5 et K_2O respectivement par arbuste.

Au Cameroun un apport simultané d'azote, de phosphore, de calcium et de magnésium est nécessaire dans les régions de bas rendement, alors que dans les plantations de grand rendement on peut se borner à épandre seulement du phosphore et du potassium.

Au début de la période de développement des arbustes la meilleure façon de donner les engrais est de les épandre autour du pied. Dans la période de fructification, les engrais peuvent être répartis sur toute la plantation ou en larges bandes entre les rangées d'arbustes. Une autre méthode consiste à épandre les engrais le long de la limite extérieure de la projection de la couronne sur le sol.

Dans les régions à une seule saison sèche, le mieux est d'épandre les engrais au début de la saison des pluies avec un apport supplémentaire 4 à 5 mois plus tard pour l'entretien des arbustes qui donnent des fruits. Dans les régions à deux saisons de pluies, on préférera la fin de la longue saison et le commencement de la courte saison pluvieuse.

On remarquera qu'au Ghana, actuellement, la récolte moyenne dans tout le pays varie de 275 à 400 kg/ha de fèves sèches. Mais une récolte aussi basse peut être aisément augmentée jusqu'à 560 kg/ha par apport d'engrais et en observant les principaux procédés agrotechniques, tels que contrôle efficace des parasites et des maladies, lutte contre les plantes adventices, récolte en temps voulu.

Outre l'avantage économique, l'emploi des engrais à petites doses augmente la longévité du cacaoyer et améliore son état. Ceci à son tour élève la résistance des arbustes aux parasites et aux maladies.

Au Nigeria, sur les sols favorables par leurs propriétés physiques l'apport d'engrais peut accroître de 30 % la récolte de fèves de cacao, si le contrôle des parasites et des maladies est partie constituante du système de culture.

Le caféier

C'est le *Coffea arabica* qui assure la part essentielle de la production mondiale du café, c'est la meilleure variété pour sa qualité, son goût et son arôme largement connus. *Coffea robusta*, cultivé principalement en Afrique, à Madagascar et en Indonésie, tient la seconde place. *Coffea liberica* et *Coffea excelsa* ont peu de valeur commerciale.

Les tropiques et les régions tropicales de hautes montagnes conviennent le mieux à la culture du caféier type *arabica*.

Les sols sur lesquels pousse le caféier peuvent être de diverse origine géologique. En Afrique occidentale, ce sont des sols formés sur gneiss et granit ; en Afrique orientale, sur des roches volcaniques massives, sur laves. Ce qui importe, ce n'est pas tant l'origine géologique, mais l'état physique des sols. Le caféier demande un sol profond, perméable, meuble. Dans les principales régions de culture du caféier au Kenya les sols sont très profonds, ce sont des argiles latéritiques. En Tanzanie, ce qui convient le mieux c'est un limon argileux volcanique rouge assez profond d'une bonne qualité mécanique.

Les racines du caféier sont très exigeantes en oxygène. Aussi, les sols argileux très lourds et mal drainés ne lui conviennent pas. Quant aux sols sablonneux très légers ils sont peu capables de retenir l'eau.

Le caféier préfère les sols légèrement acides de pH 6-6,5. On peut obtenir de bons résultats sur des sols plus acides, si ces derniers sont dans un bon état physique et renferment suffisamment de calcium et d'autres éléments nutritifs.

Le caféier pousse avec ou sans ombrage. Dans certains pays, au Kenya, par exemple, il est cultivé sans ombrage, étant donné que la pluviométrie y est trop basse pour ravitailler en eau à la fois le caféier et les arbres de couverture. Pourtant, le caféier est plus souvent cultivé sous un ombrage qui protège les plantes contre une insolation trop forte, les gelées ou les vents nocturnes froids; de plus, il tempère les écarts de température.

En outre, les arbres de couverture empêchent l'érosion et réduisent les pertes par lessivage. Ils procurent une grande quantité de matière organique et améliorent ainsi l'état physique du sol. Les arbres de couverture ont un effet favorable sur la teneur du sol en azote, surtout si ce sont des légumineuses.

Et, pourtant, l'ombrage a ses inconvénients dont le principal est la concurrence entre le caféier et les arbres de couverture pour l'eau et la nourriture. Une grande partie des éléments nutritifs s'emmagasinent dans les troncs et les branches des arbres de couverture au

cours de leur développement. Il faut en tenir compte pour le programme de fumure du caféier.

Sans ombrage, le caféier ne peut pousser que sous un climat favorable, sur sols profonds bien drainés, dans un bon état physique et avec beaucoup d'engrais. L'ombrage devient nécessaire quand les conditions pédoclimatiques sont moins bonnes. Comme le caféier ne donne pas de grandes récoltes sous couvert épais, il souffre moins d'une insuffisance en éléments fertilisants et en soins qu'un arbuste hautement productif sans ombrage.

En l'absence d'ombrage, le mulching est très recommandé surtout dans les endroits secs sur sols légers, étant donné son action favorable sur l'état physique du sol et sur la récolte. Il existe une fonction linéaire entre le degré de mulching et la récolte. Une telle réaction de la plante s'explique principalement par l'amélioration de l'état de la rhizosphère, qui se traduit par une augmentation de l'humidité accessible, une baisse de la température du sol et une amélioration de son état chimique et physique, d'où l'augmentation de la teneur des feuilles du caféier en phosphore et en potassium. En même temps, un fort mulching au début de la croissance rend moins accessible l'azote du sol, c'est pourquoi un mulching précoce peut rendre nécessaire un apport complémentaire d'engrais azotés.

Au Kenya, le mulching est très employé et a une importance de premier ordre pour une utilisation efficace des précipitations assez limitées.

On utilise largement, pour le mulching, *Pennisetum purpureum*. Ainsi, la variété locale de cette graminée est un parfait accumulateur de potassium et en renferme jusqu'à 6 % de sa masse sèche.

On forme chaque année une couche de mulch dans la même direction le long des interlignes par bandes de 2 m de large et 10 cm d'épaisseur. Pratiquement, cela représente annuellement environ 25 t de matière sèche par hectare. Le mulching fait diminuer l'acidité du sol, augmente sa teneur en carbone organique, en azote, en potassium échangeable, en phosphore accessible, mais il abaisse la teneur en calcium accessible et en manganèse. Le mulching rend le sol plus poreux, augmente l'intensité de l'absorption de l'eau par la couche superficielle du sol. Sous son influence la teneur des feuilles de caféier en phosphore et potassium augmente, quelquefois aussi la teneur en azote, mais souvent la teneur en magnésium et en calcium baisse. L'amélioration de l'état du sol par le mulching s'exprime aussi par une meilleure croissance des arbustes, même dans la saison sèche. Pour le mulching, on peut se servir de n'importe quel matériel organique, y compris les détritus des fruits du caféier.

Besoin d'éléments nutritifs et d'engrais. Le caféier éprouve un grand besoin d'engrais bien que l'exportation d'éléments nutritifs avec la récolte ne soit pas grande, surtout si la pulpe des fruits retourne au sol sous forme de mulch. Les données dont on dispose montrent que l'apport de 35 kg de N, 7 kg de P_2O_5, 50 kg de K_2O peut compenser le prélèvement des éléments nutritifs par une récolte de

1000 kg de café. Mais une alimentation supplémentaire est nécessaire pour la végétation du caféier. C'est pourquoi il faut apporter au moins 135 kg de N, 34 kg de P_2O_5 et 145 kg de K_2O par hectare de caféiers hautement productifs à croissance rapide.

L'ombrage fait diminuer les besoins de la culture en éléments nutritifs. Mais si l'ombrage est faible ou s'il n'existe tout simplement pas, le caféier voit fortement augmenter, surtout dans la période de floraison et de fructification, ses besoins d'éléments nutritifs, non seulement pour jeter les fondements d'une bonne récolte, mais aussi pour un développement simultané de tous les arbustes en vue de la récolte à venir.

L'analyse foliaire a montré qu'une fructification abondante s'accompagne de la baisse des éléments nutritifs dans les feuilles, surtout de l'azote et du potassium. Par conséquent, pour obtenir une bonne récolte et entretenir les arbustes fructifiants en bon état, il faut accorder une attention particulière aux engrais azotés et potassiques.

Les engrais azotés et potassiques sont également efficaces pour la prévention de nécroses. On a relevé une proportion inverse entre les nécroses et la teneur des feuilles en azote et en potassium. Le nombre des branches attaquées a tendance à s'annuler si la teneur des feuilles en azote est de 2,5 % et plus et en potassium, de 1,5 % et plus. Un grand coefficient de proportion inverse a été de même décelé entre la teneur des feuilles en azote et le nombre des arbustes atteints de nécrose provoquant une défoliation différenciée des rameaux. Une telle nécrose n'a pas lieu si la teneur des feuilles en azote est de 4 % et plus.

Au Kenya, la fumure azotée a fortement réduit le nombre de cas de nécrose de caféier. Mais on n'a pas constaté d'influence du phosphore sur l'attaque du caféier par la nécrose. Cet élément est surtout nécessaire au début de la croissance des arbustes. Généralement, les jeunes arbustes réagissent à son apport par une plus forte croissance du système radiculaire et des organes végétatifs aériens.

Dans les expériences de Montoya et Umaña le nombre des branches du caféier frappées de nécrose augmente avec l'intensité de la lumière et diminue avec un apport d'azote. L'influence de l'azote était d'autant plus forte que sa dose et l'intensité de l'éclairage étaient plus élevées. Il en découle que les cas de nécrose peuvent être réduits par un ombrage ou par l'apport d'azote et, sur les sols déficients en potassium aussi, par l'épandage de cet élément.

Pour la fumure des jeunes plantations de caféier il faut prêter une attention particulière à l'azote et au phosphore ; pour des arbustes fructifiants, à l'azote et au potassium.

Il ne fait aucun doute que l'azote, le phosphore et le potassium sont les principaux éléments apportés avec les engrais. Cependant, dans certaines conditions il arrive parfois qu'il faut également fournir du calcium, du magnésium, du soufre, des oligo-éléments (bore, zinc, manganèse, fer).

L'azote. Un approvisionnement suffisant en azote est de la plus grande importance pour le développement végétatif du caféier, ainsi que pour sa productivité. Les arbustes ont surtout besoin d'azote en l'absence d'ombrage car, dans ce cas, ils n'en reçoivent pas suffisamment de la matière organique des feuilles tombées des arbres de couverture, ainsi qu'en raison de la productivité élevée du caféier non ombragé.

La quantité d'azote à apporter dépend de la teneur naturelle du sol en cet élément, de l'état des arbustes, de la récolte planifiée, etc., et peut varier entre 60 et 120 kg ha avec ombrage. En l'absence de ce dernier, les doses peuvent être bien plus importantes.

Le besoin d'azote est surtout prononcé à la saison des pluies quand se forment la récolte future et, en même temps, beaucoup de rameaux, de feuilles, de bourgeons. C'est pourquoi les engrais doivent être donnés de façon qu'à cette période ils soient accessibles à la plante.

L'apport d'engrais azotés doit donc se faire au début de la saison des pluies. Un apport complémentaire d'azote par portions est également recommandé à des délais plus avancés.

En Afrique occidentale, Busch conseille de fumer le caféier en deux fois : au début de la saison des pluies (première semaine de mars) on épandra la moitié de la dose d'azote et de K_2O et toute la dose de P_2O_5 afin de stimuler la croissance des feuilles et des rameaux ; dans la dernière semaine d'août — première semaine de septembre, les 50 % restants d'azote et de potassium, afin de stimuler la croissance des fruits et d'augmenter le nombre des bourgeons à fleurs qui se forment.

Quand l'azote est déficient, les arbustes ont une croissance asymétrique et réprimée. Les feuilles sont petites et jaunissent (surtout en l'absence d'ombrage) en commençant par les branches inférieures. A mesure que la chlorose se développe, les vieilles feuilles tombent prématurément, les rameaux se dépouillent.

Dans les conditions ordinaires, l'apport d'azote par voie non racinaire, c'est-à-dire par pulvérisation des arbustes au moyen de solutions d'urée, ne peut remplacer l'épandage dans le sol. Cependant, la pulvérisation est une mesure complémentaire utile pour supprimer rapidement l'insuffisance visible d'azote ou pour apporter un complément d'azote quand la récolte mûrit. L'apport d'urée par les feuilles est un moyen rapide et commode qui complète l'épandage dans le sol et qui agit comme stimulant à la période sèche quand les fruits mûrissent. Il a trouvé un large emploi au Kenya. L'urée est une forme d'azote inoffensive pour une fumure d'appoint par les feuilles. Cependant, une solution trop forte d'urée pourrait provoquer une nécrose marginale sous forme de brûlure du bord des feuilles. Des symptômes de ce genre dépendent de la concentration de la solution d'urée, de la quantité de solution et de la grosseur des gouttes pulvérisées. Pour un volume grand ou moyen de liquide pulvérisé on recommande une solution à 1 %. Quand la quantité de liquide pulvérisé n'est pas grande, la concentration peut être augmentée. Le

caféier est sensible au biuret, on recommandera donc l'utilisation d'urée n'en renfermant que peu. La toxicité du biuret se manifeste dans l'apparition de taches de chlorose marginale sur le bord des feuilles.

Le phosphore. C'est sous les jeunes arbustes que l'apport d'engrais phosphatés est le plus efficace. Aussi recommande-t-on d'enfouir dans les trous de plantation une petite quantité de phosphore sous une forme accessible, mélangée à un compost ou à du fumier. Pour les jeunes plantes, le rapport N : P_2O_5 : K_2O est ordinairement décalé en faveur du phosphore, c'est-à-dire il est égal à 1 :2 :1, alors que pour les arbres fructifiants, le rapport 2 :1 :2 est plus courant. Chez les jeunes arbres éprouvant une insuffisance de phosphore la croissance des racines ainsi que la lignification sont réprimées. A l'âge de maturité, les plantes réagissent assez rarement à l'apport de phosphore, étant donné que leur système radiculaire bien développé est susceptible, à des étapes tardives de la croissance, de leur fournir la quantité de phosphore nécessaire. Cet élément est particulièrement important pour un développement normal des fruits sur les arbres à maturité.

En l'insuffisance de phosphore une partie de la feuille, sa pointe ordinairement, acquiert sur les branches abondamment couvertes de fruits, une coloration jaune vif qui passe au rose, au rouge foncé ou à un brun pourpre se propageant ensuite peu à peu à toute la feuille.

Le potassium. Le caféier a un grand besoin de potassium, surtout dans la période de la formation des fruits et de leur maturation. A ce moment, la teneur des feuilles en potassium peut fortement baisser.

La norme annuelle d'engrais potassiques peut être épandue en une fois au début de la saison des pluies, mais on peut la répartir en deux portions et plus. La déficience de potassium entraîne l'apparition de bandes nécrotiques rougeâtres et jaunâtres, passant ensuite au brun et au noir le long du bord du limbe en commençant par la pointe, fait qui provoque en définitive la mort des feuilles plus vieilles.

Le calcium et le magnésium. Le caféier peut pousser sur des sols légèrement acides; cependant, on recommandera un chaulage périodique des sols fortement acides, non seulement du fait qu'une réaction faiblement acide est préférable, mais plutôt pour satisfaire le grand besoin de calcium de cette culture.

L'insuffisance de magnésium est surtout provoquée par un excès relatif de potassium à cause de l'antagonisme entre le potassium et le magnésium. C'est bien le cas au Kenya, par exemple, où l'usage du mulching crée une tendance à renforcer la déficience de magnésium par excédent de potassium antagoniste dans le sol.

Aux premiers stades d'insuffisance de magnésium entre les nervures principales des feuilles mûres vert foncé on voit apparaître des taches ternes irrégulières vert olive se propageant du centre de

la feuille vers ses bords. A une étape plus avancée, les parties décolorées s'agrandissent, fusionnent en formant un dessin rhombique nettement délimité sur les nervures centrale et latérales. Les parties décolorées changent de couleur, passent du vert olive terne au jaune, puis au bronzé. Cet état est appelée nécrose en sapin.

D'après Robinson et Chenery, les concentrations limites de magnésium dans les feuilles mûres du caféier sont, en présence du fleurs ou de cerises, 0,03-0,10 % pour une forte déficience apparente, de 0,11-0,20 % pour déficience apparente ou invisible, de 0,21-0,30 % pour une insuffisance sporadique et de 0,3 % de Mg en l'absence de déficience. Le niveau critique de magnésium au-delà duquel se manifestent les symptômes d'insuffisance et où les feuilles tombent prématurément est environ de 0,20 %. Le rapport critique du potassium au magnésium dans les feuilles est de 10:1.

En l'insuffisance de magnésium il faut apporter des engrais qui en contiennent, sulfate de magnésium ou dolomie, par exemple. Une fois ces engrais épandus, 12 à 18 mois sont nécessaires pour que disparaissent les signes carentiels. Le moyen le plus efficace pour faire disparaître la déficience est de pulvériser à 3 ou 7 reprises au moyen d'une solution à 1 ou 2 % de sel Epsom à des intervalles de 2 semaines.

Les oligo-éléments. Les plus importants pour le caféier sont le zinc, le bore, le fer et le manganèse.

L'insuffisance de zinc pour cette plante s'est manifestée dans bien des pays. Elle s'exprime par une chlorose des feuilles lorsque le réseau des nervures apparaît nettement sur un fond jaune ou vert pâle. Les feuilles malades sont souvent plus petites et d'une forme elliptique ou lancéolée; elles se réunissent en touffes terminales, les entre-nœuds des rameaux étant très courts. Les feuilles tombent quand la carence en zinc est prononcée. Pour l'éliminer il faut apporter au sol du sulfate de zinc. Mais il est plus efficace de pulvériser les feuilles par une solution à 0,4 % de sulfate de zinc neutralisée. Généralement, il suffit de deux pulvérisations par an, l'une au début et la seconde au milieu de la saison des pluies pour mettre fin à cette déficience.

La pénurie de bore entraîne la nécrose des rameaux terminaux et, par la suite, une disposition des branches en éventail. Les feuilles sont alors souvent déformées, longues, étroites, coriaces; une chlorose vert olive ou jaune vert de la moitié supérieure de la feuille peut également avoir lieu. En présence d'une forte déficience de bore on utilisera chaque année 30 à 60 g de borax ou la quantité équivalente d'autres engrais au bore par arbuste. Cette pulvérisation se fait deux fois, au début et au milieu de la saison des pluies. Dans les cas de déficience moins graves et pour les jeunes arbustes, la dose sus-indiquée sera réduite, car un excès de bore peut devenir toxique et provoquer la chlorose, ainsi que de petites taches nécrotiques sur les feuilles. Il ne faudra donc pas pulvériser les arbustes plus de 2 fois par an.

Comme norme on considère une teneur des feuilles en bore de 50 mg pour 1 g de tissu foliaire; une concentration supérieure à 200 mg/g, surtout avec un bas rapport du calcium au bore dans les feuilles, devient déjà toxique. D'après Perez et autres le rapport approximatif de Ca/B dans les feuilles du caféier est respectivement de 400 à 2 500, 60 à 400 et moins de 60 pour une teneur en bore insuffisante, normale et toxique.

L'insuffisance de fer provoque la chlorose, les nervures restant vertes, ou chlorose à fin réseau différant peu de l'insuffisance de zinc par son caractère. Les symptômes sont plus souvent marqués sur les jeunes feuilles, bien que dans les cas graves l'arbre tout entier puisse être frappé. En déficience de fer, les dimensions des feuilles restent généralement les mêmes, cas contraire à l'insuffisance de zinc. Une pénurie de fer peut aussi provoquer le jaunissement des fruits.

La pénurie de fer peut survenir dans les sols à pH élevé et est souvent difficile à éliminer. De bons résultats ont été enregistrés par l'apport des chélates. On les enfouit sous un arbuste adulte à la dose de 15 g environ; sous les jeunes plantes en pépinière, à la dose de quelques grammes seulement.

La pénurie de manganèse se manifeste un peu partout. Ses principaux symptômes sont la décoloration de la paire de feuilles du sommet jusqu'au vert jaunâtre et au jaune clair avec des taches blanches. Dans ce dernier cas, la paire de feuilles suivantes jaunit aussi, mais moins.

Les symptômes de la déficience de manganèse portent en général un caractère passager ou saisonnier. Ils apparaissent d'ordinaire au début de la saison des pluies quand la croissance est le plus intense et se répètent dans la seconde moitié de cette saison. Ordinairement, on remarque une déficience de manganèse sur les sols à pH élevé. Elle peut être écartée par pulvérisation des arbres avec une solution à 0,4 % de sulfate de manganèse renfermant 0,2 % de $Ca(OH)_2$.

Actuellement, les pays cultivant le caféier, recourent largement à l'analyse foliaire pour déterminer le besoin d'engrais.

Espinosa a notamment découvert que, pour le développement optimal et la fructification du caféier sans ombrage, les plus jeunes feuilles tout à fait développées des rameaux portant des fruits doivent renfermer, dans la période des pluies, non moins de 3 % de N; 0,12 % de P; 2,3 % de K; 0,3 % de Mg et 1 à 1,2 % de Ca calculés sur la masse sèche. Dans la saison sèche et pour les arbustes cultivés sous ombrage, les niveaux critiques de l'azote et du potassium s'abaissent. En ce qui concerne les oligo-éléments, Culot et autres ont découvert que l'insuffisance de manganèse se manifeste lorsque sa teneur dans les feuilles est inférieure à 80 mg/g; celle du zinc, à 15-20 mg/g; du bore, à moins de 20 mg/g; du cuivre, à 2-3 mg/g.

En Côte d'Ivoire, les symptômes d'insuffisance de fer se manifestaient quand sa teneur dans la 3e feuille était inférieure à 70 mg/g. Pour le zinc et le cuivre, ce niveau était de 10 mg/g; pour le bore, de 20 mg/g; pour le manganèse, il dépend du type de sol. Dans la

zone de culture du caféier de Côte d'Ivoire, la déficience de manganèse, de zinc et de cuivre est largement répandue ; la pénurie de bore n'est un problème qu'à la saison sèche, tandis que la déficience de fer est insignifiante.

Dans la République Centrafricaine, la teneur minimale des feuilles en éléments nutritifs était, pour une récolte ordinaire : 1,7 % de N ; 0,09 % de P ; 0,14 % de S ; 1,0 % de K ; 2-2,2 % de Ca ; 0,3 % de Mg de la masse sèche. Servaient d'échantillon les troisièmes feuilles des rameaux primaires ou secondaires dans la partie moyenne de l'arbuste, cueillies en saison sèche à la période de la floraison (janvier) entre 8 et 10 heures.

Il existe une étroite dépendance entre la teneur des feuilles en éléments nutritifs au début de la saison sèche et la récolte attendue. A cette période, selon Borget et autres, les niveaux optimaux d'éléments nutritifs dans les feuilles sont : plus de 2,7 % de N ; 0,13-0,15 % de P ; 1,8-2,20 % de K ; 0,3-0,36 % de Mg. Sur la base de ces données, on recommande, pour la République Centrafricaine, les doses d'engrais suivantes : 60-100 g de N ; jusqu'à 60 g de P_2O_5 et 120 g de K_2O par arbuste annuellement. Cependant, Forestier propose les doses de 150 g de N, 80 g de P_2O_5, 150 g de K_2O par arbuste annuellement pour les variétés hautement productives non sélectionnées. Mais pour les clones sélectionnés très sensibles à la fumure on peut augmenter la dose d'azote jusqu'à 200 g par arbuste et par an.

Sur les sols formés sur des sables tertiaires, la norme minimale recommandée pour la Côte d'Ivoire est de 30 g d'azote et 60 g de K_2O pour un arbuste, tandis que la norme maximale est respectivement de 50 et de 100 g. Pour les sols de ce type, le rapport K_2O/N dans la fumure doit représenter 2-2,5 ; le rapport N/P_2O_5, 1,0-1,5. L'apport d'engrais minéraux doit être complété chaque année de compost ou de fumier à raison de 10 kg par arbuste.

Les sols formés sur roches granitiques et gneissiques ont besoin d'une plus grande quantité de phosphore que les sols sableux de berge. Ces sols ont généralement une teneur moyenne en potassium assimilable. Le rapport K_2O/N de la fumure doit donc varier ici de 1 à 1,5 ou 2 au maximum. Il est recommandé d'épandre en une fois toute la dose d'azote (en avril), la dose de phosphore en 3 portions (avril, juillet, octobre) et la dose de potassium en 2 portions (avril, octobre).

Au Cameroun, on épandra sous les arbustes adultes 100 g d'azote par plante principalement sous la forme de sulfate d'ammonium, en 4 portions (mars, avril, octobre et novembre). Il faut ajouter à l'azote une petite quantité de phosphore (en mars) et de potassium (en mars et, si possible, en octobre) si l'analyse foliaire révèle une déficience de ces éléments (P moins de 0,15 %, K moins de 2 % en décembre).

Dans la région du Kivu, pour maintenir la production annuelle du café au niveau de 1 500 kg/ha (environ 1 500 arbustes par hectare)

il est recommandé d'apporter chaque année 150 kg de N, 100 kg de P_2O_5 (sous forme de farine de phosphorites sur les sols acides), 150 kg de K_2O (sous forme de sulfate de potassium), 75 kg de MgO (sous forme de sulfate de magnésium) par hectare. La chaux est donnée au fur et à mesure des besoins pour maintenir le pH au niveau de 5,5. Sur de grands espaces au Kivu l'apport de bore et de zinc par les feuilles est nécessaire. Un bon résultat est obtenu par pulvérisation des arbustes au moyen de solution de borax à 0,5 % et de sulfate de zinc à 0,5 %. Sous un faible ombrage ou sans ombrage la quantité d'azote apportée aux arbustes sera augmentée jusqu'à 225 kg/ha. En présence d'une déficience de calcium il est recommandé d'apporter tous les 3 ans 3 à 5 t de calcaire dolomitique.

Sur les jeunes sols volcaniques situés au nord du lac Kivu il est recommandé d'épandre non moins de 250 kg/ha d'azote sous la forme de sulfate d'ammonium et de pulvériser au moins deux fois les arbustes au moyen d'une solution à 0,5 % de sulfate de manganèse, dans certains cas en y ajoutant du zinc et du bore.

Au Ruanda et au Burundi, Vuyst et Paquay recommandent d'apporter à chaque arbuste 200 g d'engrais azoté-phosphaté-potassique complexe de composition 20-10-10 en novembre et en février-mars; dans les régions souffrant d'une insuffisance de magnésium, 150 g à chaque arbuste du même engrais en novembre et en février-mars, associés à un apport de 100 g de kizérite en novembre. Une autre recommandation pour le Burundi :120 g de N, 20 g de P_2O_5 et 40-45 g de K_2O par arbuste et par an.

A Madagascar, les meilleurs résultats sont obtenus en apportant 800 kg/ha d'engrais azotés-phosphatés-potassiques de composition 20-10-10 en ajoutant 200 kg/ha d'urée. Pour éliminer l'insuffisance de magnésium il est recommandé de donner 5 t/ha de dolomie et (ou) de kizérite (sulfate de magnésium).

A Zimbabwe, Donovan propose le schéma suivant pour la fumure du caféier. La première année, apport d'engrais phosphatés et de chaux d'après les résultats de l'analyse du sol et 340 kg/ha d'engrais azotés-phosphatés-potassiques de composition 8-16-8 dans les trous de plantation, accompagnés de 115 kg/ha de nitrate d'ammonium calcique (26 % N) en couverture au début de janvier. La deuxième année, on fait trois apports de 115 kg chacun de nitrate d'ammonium calcique en octobre-novembre, à la mi-janvier et en mars-avril. La troisième année, un apport de 340-450 kg/ha de nitrate d'ammonium calcique en trois fois, 115 kg/ha de superphosphate double (38 % P_2O_5) et en l'absence de mulching, 115 kg/ha de chlorure de potassium. La quatrième année et les suivantes: 450-560 kg/ha de nitrate d'ammonium calcique, 115-170 kg/ha de superphosphate double et, en l'absence de mulching, 115-170 kg/ha de chlorure de potassium. Quand apparaissent des signes de pénurie de zinc il est nécessaire de fournir au sol tous les trois ans du sulfate de zinc à la dose de 22,5 kg/ha. Cependant, il est plus efficace de pulvériser les arbres d'une solution de ce sel.

Pour l'Angola, Francoso Vaz a établi les recommandations suivantes pour la fumure du caféier (tableau 55). On apportera tout le

Tableau 55

Recommandation pour la fumure du caféier en Angola

Age des arbres	Elément nutritif en g par arbuste		
	N	P_2O_5	K_2O
première année	150	100	—
deuxième année	200	—	—
troisième année	300	200	200
quatrième année	400	—	—
cinquième année et suivantes	500	300	300

phosphore et le potassium, ainsi que la moitié de la dose d'azote, au début de la saison des pluies après la chute d'environ 100 mm de précipitations, c'est-à-dire en octobre-novembre. La deuxième moitié de la dose sera donnée au début de mars, c'est-à-dire au début de la longue période de pluies. En l'absence d'ombrage la dose d'azote pourra être augmentée jusqu'à 600-700 g par arbuste.

La pulvérisation du caféier avec une solution d'un mélange de 5 kg de superphosphate et de 0,8 kg de chaux éteinte pour 100 l d'eau a donné de bons résultats dans l'Angola contre l'anthracnose de cet arbuste.

En Tanzanie, il est recommandé d'apporter au caféier non moins de 168 kg d'azote à l'hectare par an à condition de tailler convenablement les arbustes et de lutter régulièrement contre les plantes adventices. Sur les sols à pH 6,7-7,5 on peut épandre du sulfate d'ammonium. Le sulfo-nitrate d'ammonium est recommandé sur les sols à pH 5,5-6,5, par exemple, sur les limons argileux rouges du Kilimandjaro, et le nitrate calcique d'ammonium sur les sols à pH inférieur à 5,5. Il est avantageux d'épandre l'engrais en trois fois: dans les régions à saison de pluie unique, au début, au milieu et à la fin des pluies; dans les régions à deux saisons de pluie, l'une brève, l'autre prolongée: au début de la première saison et au début et à la fin de la seconde. Les doses d'engrais recommandées peuvent être augmentées à des années de fructification abondante en l'absence d'ombrage et (ou) avec arrosage copieux. En particulier, si les arbustes fournissent une récolte de 2 500 kg/ha environ à la deuxième année de fructification, il est nécessaire d'augmenter la dernière dose apportée dans la saison considérée et toutes les doses à la saison suivante. On peut également ajouter à l'eau d'arrosage jusqu'à 50 kg/ha d'azote sous forme d'urée. Les sels d'ammonium seront de préférence répartis à la surface du sol autour du pied sur un cercle d'un rayon de 25 à 100 cm du tronc. Si l'on recourt au mulching, la matière dont on

se sert à cette fin sera répartie un interligne sur deux; de l'autre côté de la rangée d'arbustes, on épandra des engrais.

Au Kenya, les recommandations pour la fumure du caféier sont établies compte tenu de l'intensité de la fructification de la plantation dans l'année courante. Pour une fructification faible (moins de 6 kg de grains décortiqués et déparchés par arbuste pour une densité de plantation de 1 327 pieds à l'hectare), il faut apporter 90 kg d'azote; pour une fructification modérée (6-9 kg de grains par pied), on apportera 110 kg d'azote; pour une fructification abondante (plus de 9 kg de grains par arbuste), 160 kg d'azote à l'hectare. La norme annuelle d'azote est apportée ici en trois fois: dans les régions à deux saisons de pluie (Kenya oriental), en avril, mai et novembre; dans les régions à une saison de pluie (Kenya occidental) en avril, juin et octobre. Sur les sols faiblement acides ou alcalins, il est recommandé d'utiliser le sulfate d'ammonium et sur les sols moyennement acides, alternativement du nitrate calcique d'ammonium et du sulfonitrate d'ammonium. Sur les sols acides on apporte deux années de suite du nitrate calcique d'ammonium et la troisième année, du sulfo-nitrate d'ammonium. Les engrais sont épandus sur une zone circulaire de 30 à 90 cm de rayon autour du pied sur les jeunes plantations ou, dans les interlignes, sur une bande de 60 à 90 cm de large dans les plantations d'arbres donnant une récolte.

Le palmier à huile

Pour de nombreux pays, le palmiste (palmier à huile) est une culture typique de plantation. C'est ce qui explique la bonne connaissance que l'on a de son alimentation minérale.

Dans la zone de culture du palmiste, les ressources d'engrais organiques, y compris le fumier, sont très limitées. Une importance décisive acquièrent donc ici les engrais minéraux dont l'efficacité est dans l'ensemble, exclusivement élevée. Ceci s'explique, principalement, par la faible fertilité naturelle de la plupart des sols sur lesquels pousse le palmiste, ainsi que par sa faculté assez élevée d'utiliser les substances nutritives apportées avec les engrais minéraux.

D'après de nombreux chercheurs, une récolte de régimes de palmistes de 150 q/ha exporte annuellement du sol en moyenne 90 à 130 kg de N, 25 à 70 kg de P_2O_5, 120 à 240 kg de K_2O et 40 kg de CaO par hectare. Selon Ferwerda, sur un hectare le palmiste exporte avec la récolte seulement 75 kg de N, 36 kg de P_2O_5, 70 kg de K_2O, 30 kg de CaO et 25 kg de MgO. Si l'on considère toutes ces données pour 20 à 30 ans et qu'on les compare aux réserves d'éléments correspondants dans les sols tropicaux, on se rend compte du rôle que joue ici une fumure systématique.

La déficience d'azote dans l'alimentation du palmiste exerce une influence négative surtout sur l'appareil assimilateur et la crois-

sance végétative par suite du jaunissement de l'arbuste qui commence aux plus jeunes feuilles et dans d'autres parties vertes.

La déficience de phosphore se manifeste dans le fait que les plus vieilles feuilles du palmiste acquièrent une teinte vert olive et deviennent mates. La floraison du palmier ainsi que la formation du fruit sont alors freinées.

Le palmiste souffre le plus souvent d'une insuffisance de potassium. Ceci s'explique par son grand besoin de cet élément et par la faible teneur en potassium mobile des principaux types de sols sur lesquels il est cultivé. La carence en potassium se manifeste particulièrement sur les sols légers d'où le potassium est lessivé dans la saison des pluies. La déficience de potassium se manifeste par une chlorose, depuis la pointe et les bords des plus vieilles feuilles. Quand la carence en potassium est très forte, il se forme sur les feuilles des taches brunes desséchées appelées « bronzing » ou « orange spotting ». Beaucoup de maladies physiologiques du palmiste (« orange spotting » , par exemple) qui réduisent fortement sa productivité en Afrique, sont justement dues à une insuffisance de potassium. L'atteinte du système conducteur par un champignon, *Fusarium oxysporum*, se renforce aussi considérablement en l'absence de potassium.

On a noté également au Nigeria que l'appauvrissement graduel du sol végétal en potassium, qui se fait sentir immédiatement dès qu'on met en valeur la forêt africaine pluvieuse, atteint des valeurs critiques au bout de 10-15 ans et parfois même plus tôt. Dans ces conditions, la récolte du palmier à huile diminue en proportion directe de la diminution de la teneur du sol en potassium assimilable. Une situation analogue a été observée au Bénin, au Cameroun, au Zaïre. C'est pourquoi les gains de récolte procurés par des doses d'engrais potassiques même insignifiantes sont extrêmement grands et atteignent, dans certains cas, 100 % et même 300 %.

En Afrique occidentale, le palmiste souffre souvent d'une déficience de magnésium. Elle se manifeste dans la formation, entre les nervures des plus vieilles feuilles, de taches d'abord jaunes, puis orangées (« yellowing » ou « orange frond »). La croissance et le développement des palmiers s'en trouvent réprimés, la quantité et la masse des régimes se réduisent et la récolte baisse notablement.

La déficience de magnésium devient parfois le principal facteur limitant la croissance et la fructification. L'action néfaste de cette insuffisance peut se manifester dès les premières années qui suivent la plantation. Dans de nombreuses régions d'Afrique la carence en magnésium s'accentue après un apport de fortes doses de potassium en raison d'un certain antagonisme entre les cations. En faisant l'estimation de la fertilité des sols il faut donc vérifier non seulement la teneur absolue en formes mobiles de ces éléments, mais aussi le rapport entre eux.

Sur les plantations de palmiers à huile on a constaté aussi une déficience de bore. En cas d'insuffisance de bore dans l'alimentation des palmiers, ce sont d'abord les pointes des plus jeunes feuilles qui

meurent, puis le point végétatif est attaqué d'une pourriture sèche.

Les gains de récolte procurés par différentes sortes de fumure sont déterminés par les particularités de la ration alimentaire du sol donné. Le tableau 56 montre les résultats d'expériences effectuées en Côte d'Ivoire.

Tableau 56

Influence des engrais minéraux sur la récolte de palmiste en savane

Sorte d'engrais	Pour un palmier			
	Régimes (nombre)	kg	%	Masse d'un régime, kg
Témoins	1,0	13,2	100	12,1
NP	1,0	13,8	104	17,3
K	4,2	99,4	753	23,6
PK	4,2	98,9	740	25,3
NPK	4,0	97,1	735	23,5

Comme le montrent ces données, c'est l'engrais potassique qui a été décisif, alors que les engrais azotés et phosphatés n'exerçaient pas d'influence notable. Le potassium augmentait non seulement le nombre des régimes, mais aussi leur taille. Au Bénin, on a également constaté le rôle prédominant du potassium. D'après Pichel, un kilogramme de K_2O assure ici l'obtention d'un complément de 25 kg de régimes par palmier.

Il est très difficile de déterminer si le palmier à huile reçoit suffisamment d'éléments nutritifs. Les méthodes d'analyse des sols employées aujourd'hui ne conviennent guère sous les tropiques, étant donné qu'ici les éléments nutritifs sont plus fortement fixés dans le sol et sont lessivés en quantité beaucoup plus grande que dans les zones à climat tempéré. C'est pourquoi, pour déterminer le besoin d'engrais du palmier à huile, on recourt largement à l'analyse foliaire qui a été mise au point pour la première fois sur cette culture par un spécialiste bien connu, Ollagnier. Par la suite, on a réalisé de nombreuses recherches sur l'analyse foliaire du palmiste qui ont confirmé sa valeur théorique et pratique.

Les niveaux critiques de teneur des feuilles en éléments divers, établis par différents auteurs, varient dans d'assez larges limites. Ceci s'explique, d'une part, par des différences dans la méthode de choix des épreuves sur les feuilles et, de l'autre, par les rapports des éléments nutritifs dans les différents sols. On ne peut donc pas faire appel à des recommandations mises au point pour d'autres conditions.

Au Zaïre, la teneur optimale des feuilles en éléments nutritifs est en moyenne (en % de masse sèche): K_2O, 2,05-2,30; P_2O_5, 0,48-0,53; MgO, 0,42-0,58; CaO, 0,91. Ollagnier mentionne les valeurs critiques suivantes pour les différents éléments (en %): N—2,75;

P_2O_5—0,34 ; K_2O-1,38 ; CaO-0,84 ; MgO-0,40. A de tels taux, il faut apporter les engrais manquants. Au Bénin, comme le remarque Pichel, en cas de déficience prononcée de potassium sa teneur dans les feuilles tombait à 0,33-0,50 % ; après une fumure d'appoint, le taux de K_2O dépassait 1 %. En même temps, la récolte augmentait de 50 %.

L'analyse foliaire permet de se rendre compte des particularités de l'assimilation de tel ou tel élément et de la vitesse de son arrivée dans la plante. Dans les recherches de Forde et autres effectuées au Nigeria, l'apport de sulfate de magnésium élevait le niveau de MgO dans les feuilles de 0,24 à 0,38 %, c'est-à-dire jusqu'à une valeur proche de l'optimum. Avec un apport simultané de potassium, le taux de MgO était plus bas et atteignait 0,32 %. Une grande importance revêt de même le rapport du potassium et du phosphore dans les plantes. On considère comme optimal un rapport K_2O : P_2O_5 égal à 2,5-3,5. Si ce rapport est inférieur à 2,5, il faut apporter un complément d'engrais potassique. S'il est supérieur à 3,5, un apport d'engrais phosphaté sera efficace.

Il faut aussi remarquer que des signes carentiels visibles apparaissent sur les plantes assez tard, quand leur teneur absolue en éléments nutritifs atteint un niveau assez bas et non seulement dans le cas où leur bilan est déséquilibré. Il est donc préférable, pour déterminer en temps voulu et correctement les besoins du palmiste en engrais, d'utiliser les résultats de nombreuses années d'essais en champ, simultanément avec les données des analyses foliaire et du sol.

Les doses et les proportions des différents engrais dépendent des conditions concrètes. Au Nigeria, par exemple, il est recommandé d'épandre sur un hectare de jeunes plantations 10 à 15 kg de N ; 15 à 30 kg de P_2O_5 ; 15 à 30 kg de K_2O. Pour les plantations donnant des fruits, ces doses seront respectivement 10-20, 15-30, 50-100 kg/ha (pour une densité de 150 plantes à l'hectare). Les données de nombreux chercheurs sont généralisées au tableau 57.

Tableau 57

Dose d'engrais pour le palmier à huile suivant son âge

Age, ans	en g pour 1 palmier				en kg à l'hectare			
	N	P_2O_5	K_2O	MgO	N	P_2O_5	K_2O	MgO
1	50-100	50-100	120	50	10-20	10-30	25	10
2	100	100-200	240	100	20	30-40	50	20
3	150	150-300	360	150	30	30-60	75	30
4	200	200-400	480	200	40	40-80	100	40
5	100-200	100-200	500	200-250	20-50	30-60	60-150	40-50

Sur les jeunes plantations, il est recommandé d'apporter les engrais autour du pied, mais dans les plantations fructifiantes, il vaut mieux les épandre sur toute la surface, car à ce moment, le système radiculaire du palmier s'étend aux interlignes. Un apport fractionné des engrais — 4 fois par an — est préférable.

Le palmiste n'est pas exigeant envers la forme des engrais. Sont couramment employés parmi les engrais azotés le sulfate d'ammonium, le sulfo-nitrate d'ammonium, le nitrate calcique d'ammoniac. Parmi les engrais phosphatés sont également efficaces, par exemple, les superphosphates, les précipités ou même les phosphorites. Parmi les engrais potassiques, on préférera le sulfate de potassium. Cet engrais est recommandé parce que les ions sulfates qu'il renferme exercent une influence bénéfique sur la synthèse et l'accumulation d'huile dans les fruits.

On peut suppléer à la déficience de magnésium dans l'alimentation du palmiste en apportant soit du patentkali, soit de la kizérite (sulfate de magnésium).

Il est recommandé de varier de temps à autre la forme des engrais utilisés et le système de fumure.

Ces derniers temps, on a enregistré dans de nombreuses régions des cas de déficience, dans les palmeraies, d'oligo-éléments et, avant tout, de bore et de zinc. Pour y mettre fin, on pulvérise les arbres au moyen de solutions renfermant ces oligo-éléments.

Les engrais minéraux sont utilisés principalement pour satisfaire immédiatement les besoins des plantes en éléments nutritifs. En même temps, l'emploi d'engrais organiques vise surtout à conserver et à augmenter la teneur du sol en humus et à assurer ainsi la fertilité du sol.

En Afrique occidentale, parmi les engrais organiques le fumier et les composts sont en quantité réduite ou manquent même tout à fait. La sidération (engrais vert) offre une bonne possibilité de ravitaillement du sol en matière organique. Cependant, la culture de l'engrais vert n'est possible que si la pluviométrie est suffisante pour que les palmistes et les plantes de l'engrais vert soient pourvus, en même temps, de suffisamment d'eau. Dans les régions où la saison sèche est prononcée la masse verte de la sidération doit être fauchée et on l'enfouira avant la fin de la saison des pluies. On cultive ordinairement comme engrais verts des légumineuses qui, une fois enfouies dans le sol, non seulement y augmentent la quantité de matière organique, mais encore satisfont en partie les besoins des palmiers en azote.

Au moment de l'enfouissage de la sidération il faudra augmenter de façon correspondante les normes d'engrais phosphatés et potassiques, surtout sur les sols légers.

Dans diverses régions sous les tropiques on cultive comme engrais vert, dans les palmeraies, de nombreuses espèces des genres *Indigofera*, *Tephrosia*, *Cassia*, *Crotalaria*, ainsi que *Calopogonium mucunoides*, *Centrosema pubescens*, *Mimosa invisa*, *Pueraria phaseoloides*.

Les espèces *Phaseolus lunatus*, *Mucuna capitata*, *Canavalia ensiformis*, *Crotalaria valetonii* poussent rapidement et conviennent par là même aux régions où la saison des pluies n'est pas prolongée.

Le cocotier

L'alimentation minérale et la fumure du cocotier ne sont pas encore suffisamment connues. On sait pourtant que ses besoins en substances nutritives sont proches de ceux du palmier à huile. Le besoin d'azote annuel du cocotier varie entre 64-91 kg/ha ; de P_2O_5, de 29 à 40 kg/ha ; de K_2O, de 95 à 138 kg/ha.

Le plus souvent, le cocotier souffre d'une insuffisance d'azote et de potassium ; la carence en phosphore est relativement rare et surtout sur les sols latéritiques et sablonneux.

L'apport d'engrais minéraux améliore la croissance végétative du cocotier, accélère la fructification et augmente la récolte de coprah.

C'est avant tout l'azote et le phosphore qui sont nécessaires aux jeunes palmiers. En même temps, le potassium l'est surtout à la phase de la fructification, ce dont témoignent les résultats des expériences effectuées en Côte d'Ivoire (tableau 58).

Tableau 58

Influence du potassium sur un cocotier de huit ans

Indices	Variantes	
	Sans potassium	Avec potassium
Nombre d'inflorescences sur un palmier	5,8	8,2
Nombre de fleurs femelles sur un palmier	84,0	136,0
Nombre de noix sur un palmier	11,6	37,0
Quantité de coprah par noix (g)	143,0	159,0
Quantité de coprah par palmier (kg)	1,7	5,9

La nécessité d'une fumure du cocotier dépend de la fertilité du sol. En particulier, il a été établi que le cocotier répond bien à l'apport d'engrais azotés si la teneur du sol en azote assimilable est inférieure à 0,02 %. L'apport d'engrais potassiques est très efficace si la teneur du sol en formes accessibles du potassium ne dépasse pas 0,005 %. On a constaté également que sur les sols acides le chaulage améliore les propriétés du sol et accroît la récolte du cocotier.

Les expériences effectuées au Bénin ont montré que l'apport, autour du pied d'un cocotier portant des noix, de 1,5 kg de chlorure de potassium par an augmente de 3 à 6 kg par palmier la récolte de coprah. Un apport simultané d'engrais potassiques et azotés, ainsi que de sulfate de magnésium accroît encore davantage la récolte. Mais on a relevé ici qu'un excès d'engrais potassique était néfaste. Pour les

jeunes plantations, comme nous l'avons déjà dit, un rôle prédominant revient aux engrais azotés.

Krishna Marar et Pandalai ont comparé l'efficacité du sulfate d'ammonium et du nitrate du Chili pour la fumure du cocotier. Le gain moyen de récolte de noix par palmier quand on apporte du sulfate d'ammonium était de 2,6 kg et, avec le nitrate du Chili, de 6,4 kg. Les auteurs expliquent l'efficacité élevée du nitrate du Chili par la présence de sodium.

Briolle a mis au point des recommandations pour la fumure du cocotier au Bénin. D'après ces recommandations, il faut apporter chaque année les doses d'engrais suivantes: par palmier jusqu'à trois ans d'âge des arbres: 0,3 kg de sulfate d'ammonium, 0,4 kg de précipité et 0,25 kg de KCl; par la suite et jusqu'au début de la fructification: 0,5 kg de sulfate d'ammonium et 0,5 kg de KCl; pendant la fructification: 1,5 kg de KCl par arbre.

Remarquons que dans les plantations de cocotiers les engrais minéraux ne sont jusqu'à présent épandus que sur une très petite surface. Dans de nombreux pays, on se contente de laisser le bétail passer la nuit dans les palmeraies. Un tel moyen de fumure est répandu, par exemple, en Afrique orientale. Il est pourtant connu que de fortes doses d'engrais organiques accroissent de beaucoup la productivité des palmiers. Il est avantageux d'apporter annuellement à chaque palmier 50 kg de fumier ou de compost et 10 ou 20 kg de cendre de bois.

Dans tous les cas, il faut enfouir dans le sol les engrais épandus.

L'arachide

L'arachide est une des cultures les plus répandues et elle occupe une place importante dans la production mondiale de protéine végétale et d'huile alimentaire.

En Afrique occidentale, c'est le Sénégal et le Nigeria qui produisent la plus grande quantité d'arachides. En 1977, au Sénégal, 1 million d'hectares étaient occupés par l'arachide, la production globale étant de 700 000 tonnes. Au Nigeria, la production globale d'arachide atteignait 330 000 tonnes. Dans ces deux pays, l'arachide est la culture principale, dans de nombreuses régions elle occupe plus de la moitié de toute la surface ensemencée.

La République Sud-Africaine, le Congo, le Soudan, le Niger, l'Ouganda, la Gambie, le Cameroun produisent aussi beaucoup d'arachide.

L'arachide réclame la présence, dans le sol, de substances nutritives assimilables et, généralement, sa récolte s'accroît sensiblement avec la fumure. Selon Bating et Andersen, avec une récolte de graines de 21,6 g/ha l'arachide prélève du sol 72 kg de N; 29,4 kg de P_2O_5; 29,4 kg de K_2O à l'hectare. Selon d'autres données, avec une récolte de graines de 21,2 g/ha l'arachide exporte 167 kg de N, 22 kg de P_2O_5 et 87 kg de K_2O par hectare. Au Sénégal, avec une récolte

de 15,1 q/ha de graines et la quantité de fanes correspondante, l'exportation est de 109,5 kg de N, 6,2 kg de P_2O_5, 32 kg de K_2O. Il est probable que ces grandes variations de quantité de substances nutritives consommées soient dues aux propriétés des variétés et aux différences de conditions pédoclimatiques.

Comme les autres légumineuses, l'arachide accumule l'azote. En une saison, elle peut accumuler jusqu'à 100-120 kg/ha d'azote. On observe souvent sur ses racines un fort développement des nodosités. Néanmoins, les engrais minéraux azotés accroissent d'ordinaire fortement la récolte de cette culture. Mais la norme d'azote ne doit pas être élevée, il suffit amplement de donner 10 à 25 kg d'azote à hectare. Notons que les formes à tiges couchées répondent moins bien aux engrais azotés que les types à tiges dressées.

Suivant le sol, les normes d'engrais phosphatés varient, pour l'arachide, de 0 à 100 kg de P_2O_5; celles d'engrais potassiques, de 0 à 75 kg de K_2O par hectare. Les gains de récolte des graines par apport de normes recommandées moyennes d'engrais atteignent 10 à 14 q/ha. Comme source de phosphore il est avantageux d'employer la farine de phosphorites finement moulue. L'arachide répond fort bien à un apport de fumier, surtout sur les terres rouges (ferralitiques).

Au Sénégal, il est efficace d'apporter un engrais minéral complet à l'arachide. Ainsi, dans la région de Kaolack, même une faible norme d'engrais (8 kg/ha de N sous forme de sulfate d'ammonium, 12 kg/ha de P_2O_5 et de K_2O sous forme de précipité et de chlorure de potassium) fait augmenter la récolte de graines de 5,4 à 5,8 q/ha. Dans la région Thiès on a essayé un mélange de 50 kg de sulfate d'ammonium et 50 kg de chlorure de potassium additionnés d'oligo-éléments. Les gains de récolte variaient dans les limites de 4,4-5 q/ha. Des gains proches de ceux-ci ont été obtenus dans d'autres régions du Sénégal.

Dans le Nigeria septentrional on observe souvent une carence en soufre de l'arachide. C'est pourquoi la récolte d'arachides augmente de 7 à 14 q/ha quand on apporte du soufre en poudre, du plâtre, du sulfate de sodium et autres substances renfermant du soufre. Une bonne réaction de la culture à un apport de soufre explique l'efficacité élevée en ces lieux du superphosphate en comparaison des autres formes d'engrais phosphatés. Il faut ajouter que l'épandage du superphosphate directement dans le sillon sous les semences au semis est un peu plus efficace que l'épandage à 7,5 cm de la lignée. Pourtant, l'apport du superphosphate à la volée en fumure d'appoint 4 semaines après les semis d'arachide ne le cède en rien à l'apport au moment du semis.

D'après Bockelée-Morvan, dans les régions humides du Sénégal l'épandage de phosphates locaux relativement peu solubles donne de bons résultats (gain de récolte des graines jusqu'à 6 q/ha), mais dans les régions plus sèches (350-500 mm), ils sont inopérants.

Dans les régions où le soufre est fortement déficient dans le sol,

le sulfate d'ammonium a l'avantage sur les autres engrais azotés à condition de faire un chaulage. Cependant, dans la plupart des régions, les diverses formes d'engrais azotés sont d'une efficacité à peu près égale. Par exemple, dans les expériences faites en Israël, l'accroissement moyen (en deux années) de la récolte de graines par l'apport de sulfate d'ammonium avant le semis était de 12,2 q/ha, le gain produit par l'ammoniac et le nitrate d'ammonium, 11,8 q/ha ; par l'ammoniac liquide, 10,3 q/ha. L'apport des engrais en deux fois augmentait un peu leur efficacité.

Beaucoup d'expériences sur l'emploi d'oligo-éléments ont été effectuées au Sénégal. On a établi que le besoin de l'arachide en manganèse augmentait fortement après un chaulage, mais de trop fortes doses d'engrais manganésiens ont un effet toxique. Prévot signale de bons résultats fournis par l'emploi d'oligo-éléments complexes, le mélange comprenant 9 % de manganèse, 6 % de fer, 3 % de cuivre, 3 % de zinc, 12 % de bore et 0,5 % de molybdène. Les oligo-éléments sont à apporter en même temps que les engrais minéraux.

Les procédés d'analyse foliaire pour déterminer les besoins d'engrais de l'arachide sont assez bien mis au point. Giller et Prévot mentionnent les taux suivants de substances nutritives dans les feuilles, au-dessous desquels l'apport d'engrais est indispensable : N — 3,5 %, P — 0,225 %, K — 0,8-1,0 %, Ca — 1,2-1,5 %, Mg — 0,5 %.

Le cotonnier

En Afrique centrale et occidentale, les principales surfaces ensemencées en cotonnier se concentrent au Tchad, dans la République Centrafricaine, en Côte d'Ivoire, au Cameroun, au Mali, en Haute-Volta, au Bénin, au Togo, au Sénégal, dans le Niger et le Nigeria.

Le système radiculaire du cotonnier se développe rapidement après l'apparition des jeunes pousses et atteint, au bout de 5 ou 6 jours, 12 à 15 cm de long. C'est généralement à ce moment, que commence la formation de racines latérales. Deux semaines après l'apparition des pousses, les racines pénètrent à une profondeur de 40 à 50 cm. Aux phases de floraison et de fructification, dans les 10 cm superficiels du sol les racines latérales meurent en raison de la sécheresse de cet horizon. Sur les sols gris situés sur les éléments élevés du relief, la zone d'absorption la plus active du système radiculaire du cotonnier au moment de la floraison est située assez profondément, les racines n'assimilent donc que les substances nutritives des engrais enfouis à une profondeur de 18 à 20 cm au moins.

Sur les sols de prairie marécageux plus humides situés dans les éléments bas du relief, proches du niveau des eaux souterraines les couches supérieures du sol étant alors humides, les racines peuvent se développer dans des horizons plus élevées que sur les sols gris.

Le cotonier consomme une assez grande quantité de substances nutritives. D'après Cristidis et Harrison, l'exportation d'azote, de

phosphore, de potassium, de magnésium et de calcium par le cotonnier est caractérisée par les valeurs suivantes (tableau 59).

Tableau 59

Exportation des éléments nutritifs par le cotonnier

Indices	Masse de matière sèche		Exportation, kg/ha				
	%	kg/ha	N	P_2O_5	K_2O	MgO	CaO
Tiges, feuilles, capsules, racines	66,41	3 520	64,7	25,9	62,6	19,6	76,1
Graines	23,03	1 220	38,2	15,5	14,3	6,7	3,0
Fibre	10,56	560	1,9	0,6	2,6	0,5	1,1
Total	100,0	5 300	144,8	42,0	79,5	26,8	80,2

L'exportation des substances nutritives par le cotonnier par unité de coton brut récoltée dépend du rapport entre les organes végétatifs et reproducteurs. Plus grand est le nombre des fleurs fécondées et plus il se forme de capsules pour une même masse végétative, moins il y aura de substances nutritives absorbées par unité de coton brut récoltée. Pour une plus grande masse végétative et un nombre moins grand de capsules, la consommation d'éléments nutritifs nécessaires pour former une unité de récolte augmente. Dans les variétés de cotonnier à fibre longue où la proportion entre les organes végétatifs et reproducteurs est plus large, l'exportation d'azote, de phosphate, de potassium pour 1 tonne de coton brut est plus grande que dans les variétés à fibre courte.

Quand la récolte de coton est élevée (50 q/ha et plus) le rapport entre les organes végétatifs et reproducteurs est plus favorable. L'exportation d'éléments nutritifs par tonne de coton brut est donc, dans ces cas, un peu moins élevée que losque la récolte est moins bonne. Avec une agrotechnique meilleure et une bonne récolte, les plantes utilisent d'une façon plus rationnelle les substances nutritives pour constituer une unité de récolte.

La fibre contient peu d'azote, de phosphore et de potassium. La majeure partie de ces éléments se trouve dans les graines et dans les organes végétatifs de la plante. Le tableau 60 donne une idée de la répartition de l'azote, du phosphore et du potassium dans la masse aérienne du cotonnier.

Suivant les proportions de masse végétative et de coton brut dans la récolte totale, la quantité de substances nutritives nécessaires aux plantes pour constituer une tonne de coton brut varie de 200 % pour le phosphore et le potassium et même davantage pour l'azote. En moyenne, on peut estimer que, pour former une tonne de coton brut et la quantité correspondante de masse végétative il faut aux plantes environ 50 kg de N, 15 kg de P_2O_5, 50 kg de K_2O.

Tableau 6

Répartition des éléments nutritifs dans le cotonnier (en %)

Elément	Graines	Fibre	Feuilles	Tiges	Capsules
Azote	32,4	2,0	34,9	18,2	12,5
Phosphore	53,9	1,5	25,0	12,3	7,3
Potassium	2,5	1,0	76,1	14,3	6,1

Dans la première période de végétation, le cotonnier pousse lentement. Cependent, à partir de la phase de formation des boutons la croissance des plantes augmente fortement, ainsi que l'accumulation de matière organique. Avant la formation de boutons, les plantes accumulent environ 4-5 % ; de la formation de boutons à la floraison, 25 à 30 % de matière organique calculée d'après sa teneur maximale dans les plantes. L'accroissement de la matière organique dans le cotonnier se poursuit dans la suite jusqu'au début de la maturation. A ce moment, la croissance des organes végétatifs cesse presque totalement, mais la quantité de masse sèche des plantes continue à augmenter grâce au développement des organes reproducteurs.

A mesure que l'accumulation de la matière sèche par les plantes augmente, la consommation d'éléments nutritifs le fait aussi. De l'apparition des jeunes pousses à la phase de formation des boutons les plantes consomment environ 2-3 % de potassium et 3-5 % d'azote et de phosphore, calculés d'après leur quantité totale dans la récolte. Du début de la formation des boutons jusqu'à la floraison en masse, le cotonnier absorbe environ 25 à 30 % d'azote et 15 à 20 % de phosphore et de potassium. De la floraison à la maturation en masse est assimilée la majeure partie des substances nutritives, c'est-à-dire environ 65 à 70 % d'azote, 75 à 80 % de phosphore et de potassium. Ainsi, dans la période qui suit la floraison le cotonnier exige beaucoup de substances nutritives, surtout du phosphore et du potassium (tableau 61).

Tableau 61

Dynamique de l'assimilation des éléments nutritifs par les plantes du cotonnier (en % de l'exportation totale)

Période	N	P_2O_5	K_2O
De l'apparition des jeunes pousses à la formation de boutons	8,4	8,1	10,0
De la formation de boutons à la fructification	59,7	56,1	63,6
De la fructification à la fin de la végétation	31,9	35,8	26,4

Dans la première période de croissance et de développement, le cotonnier est sensible à une pénurie de phosphore et d'azote facilement assimilables dans le sol, bien qu'il en consomme relativement peu. A cette période, une meilleure croissance des plantes est observée quand on apporte au sol des engrais phosphatés. Au moment de la floraison et de la fructification les plantes bien approvisionnées en azote et, surtout, en azote et en phosphore poussent mieux.

Sur les sols de culture cotonnière irriguée, l'azote de l'ammonium des engrais minéraux se nitrifie rapidement, les nitrates formés en abondance remontent dans la couche superficielle du sol (1 à 5 cm) avec le courant d'eau ascendant. Dans ces conditions, si les engrais azotés ne sont apportés qu'avant le semis, au moment de la floraison du cotonnier la quantité d'azote dans le sol végétal diminue fortement. Pour satisfaire la grande exigence d'azote du cotonnier au moment de la floraison et de la fructification, il faut donc utiliser les engrais azotés en culture d'appoint pendant la période de végétation. En outre, le rejet de nitrates à la surface du sol peut être réduit en utilisant ensemble des engrais minéraux et organiques.

Dans les sols carbonateux, les sels hydrosolubles de l'acide phosphorique se transforment assez vite en phosphate de calcium bisubstitué. Le processus ne s'arrête pas là et se poursuit progressivement jusqu'à la formation de phosphates peu solubles et peu accessibles aux plantes. Les composés peu solubles de l'acide phosphorique se forment avec plus d'intensité dans les sols à gley renfermant beaucoup de sesquioxydes. Sur ces sols, il ne faut donc pas placer les engrais phosphatés au fond du sillon qui passe souvent dans un horizon à gley. Etant donné leur peu de mobilité dans le sol, la majeure partie de la norme annuelle des engrais phosphatés doit être épandue au labour et, seulement une partie, en fumure d'appoint enfouie aussi profondément que possible.

La faible teneur en azote et en phosphore des sols des régions de culture cotonnière conditionne la grande efficacité des engrais azotés et phosphatés. C'est ce qu'attestent, entre autres, les résultats d'expériences effectuées en U.R.S.S. (tableau 62).

Tableau 62

Effet des engrais minéraux sur la récolte de coton brut

Variante d'expérience	Récolte, q/ha	Gain de la récolte, q/ha
Témoin (sans engrais)	24,8	—
PK	28,0	3,2
NP	33,8	9,0
NK	33,6	8,8
NPK	36,6	11,8

Remarque : doses de N, P_2O_5, K_2O — 100 kg/ha.

Quand un sol est longtemps utilisé sous culture du coton en irrigation, la teneur de la couche arable en azote et en carbone diminue nettement.

Dans de nombreux pays, au Soudan et en Egypte par exemple, il n'est pas admis actuellement de donner une fumure potassique au cotonnier. Ceci s'explique par le fait que la teneur en potassium assimilable des sols de culture irriguée du cotonnier est relativement grande et que leur approvisionnement en cet élément est plus élevé qu'en azote et en phosphore. Cependant, quand l'exportation du potassium par d'abondantes récoltes de coton augmente, la teneur en potassium assimilable baisse fortement et il se crée des conditions propices à un emploi efficace d'engrais potassiques. C'est ce dont témoignent, par exemple, les données obtenues sur un chernozem typique irrigué depuis longtemps (tableau 63).

Tableau 63

Influence des engrais potassiques sur la récolte de coton

Doses de K_2O, kg/ha	Récolte, q/ha	Gain de récolte, q/ha
0	37,4	—
50	40,3	2,9
100	42,5	5,1
150	43,7	6,3

L'emploi d'engrais potassiques est plus efficace sous le cotonnier avec des doses élevées d'azote et de phosphore.

En Afrique centrale et occidentale, outre les engrais azotés et phosphatés, de bons résultats sont procurés par l'apport d'engrais soufrés. C'est ce dont témoignent, entre autres, les résultats d'expériences faites à la Station Expérimentale de Bébedjia dans la République du Tchad (tableau 64).

Tableau 64

Influence d'une fumure au soufre sur la récolte de coton brut (après apport de 40 kg/ha de N)

Dose de soufre (kg/ha)	Récolte, kg/ha	Gain de récolte, %
0	1759	100
12	2188	124
24	2297	130
49	2333	133

Les récoltes plus abondantes obtenues à cette même station avec une fumure au sulfate d'ammonium en comparaison des récoltes obtenues après un apport d'urée s'explquent probablement aussi par le soufre contenu dans le sulfate d'ammonium (tableau 65).

Tableau 65

Influence de diverses formes d'engrais azoté sur la récolte de coton brut

Variante d'expérience	Récolte, q/ha	Gain de récolte, %
Témoin	1397	100
Sulfate d'ammonium (20 kg/ha de N)	1691	121
Urée (20 kg/ha de N)	1362	98
Témoin	945	100
Sulfate d'ammonium (40 kg/ha de N)	1332	141
Urée (40 kg/ha de N)	1145	122

Des résultats analogues ont été obtenus dans des expériences effectuées à la station expérimentale de Saria (Haute-Volta).

La fumure soufrée sera apportée au semis ou au début de la période de croissance et de développement des plantes, afin de contrôler efficacement les signes d'insuffisance de soufre. Dans la plupart des cas, le soufre est apporté en même temps que l'azote sous forme de sulfate d'ammonium au semis ou au démariage des pousses. L'apport de 100 kg de sulfate d'ammonium renfermant 23 kg de soufre satisfait d'ordinaire entièrement les besoins du cotonnier. On a pourtant constaté des cas où un excès de soufre réprimait légèrement la croissance et le développement des plantes et faisait baisser la récolte de coton brut.

L'accumulation de l'azote dans la couche superficielle du sol par remontée des nitrates avec le courant d'eau ascendant crée des conditions favorables à l'alimentation azotée des jeunes pieds de cotonniers qui n'ont pas encore un système radiculaire profond.

En même temps, avec l'eau des arrosages effectués au cours de la période de végétation l'azote nitrique redescend dans les couches inférieures du sol. Dans les périodes entre les arrosages, si la température de l'air est élevée et si son humidité ne l'est pas, l'eau s'évapore d'une façon intense. En même temps que l'eau, les nitrates remontent. Ceci empêche leur utilisation par les racines du cotonnier qui se développent déjà dans les couches inférieures plus humides du sol. C'est pourquoi, si l'on apporte de faibles doses d'engrais azotés, il vaut mieux les épandre après le semis en irriguant et en travaillant les interlignes.

Il est utile de diviser une forte dose d'azote en portions. Une petite portion sera enfouie au labour ; la majeure partie, après le semis. Avec une telle utilisation, l'efficacité des engrais azotés croît. Remarquons, cependant, que sur les sols où le niveau des eaux souterraines est élevé, sur les sols salifères exigeant des arrosages pour les laver et sur les sols reposant sur sable et cailloutis, il n'est pas recommandé d'apporter les engrais azotés au labour et de ne donner toute la dose qu'après le semis.

Il est avantageux d'apporter une partie de l'engrais comme fumure d'appoint dans les interlignes ou par les feuilles au début de la floraison. C'est ce que montrent les résultats des expériences de Braud à Kogoni (Mali) (tableau 66).

Tableau 66

Influence de la fumure d'appoint d'urée sur la récolte de coton brut

Dose d'urée (kg/ha) en fumure d'appoint des interlignes 48 jours après le semis	Dose d'urée (kg/ha) en fumure d'appoint par les feuilles au bout de		Dose totale d'azote (kg/ha)	Récolte, kg/ha	Gain de récolte, kg/ha de N apporté en fumure d'appoint par les feuilles
	48 jours après le semis	63 jours après le semis			
0	0	0	0	1494	—
0	40	—	18	1997	27,9
0	20	20	18	1939	24,7
200	—	—	90	2856	—
200	40	—	108	3002	8,1
200	20	20	108	2916	3,3

Sur la plupart des sols tropicaux, les engrais phosphatés sont peu mobiles car ils sont avidement adsorbés par ces sols en formant des phosphates de calcium peu solubles à l'endroit de leur apport. Pour augmenter l'efficacité de ces engrais il faut faire appel à un enfouissage profond. C'est pourquoi toute la dose d'engrais phosphatés ou sa majeure partie est donnée avant le semis par un labour profond.

Si les engrais phosphatés sont apportés à de fortes doses, il sera utile d'en donner une partie comme fumure d'appoint au cours du travail des interlignes. L'effet de l'engrais en est accru (tableau 67).

Tableau 67

Influence du superphosphate apporté par portions sur la récolte de coton

Variante de l'expérience	Récolte de coton brut (q/ha)
Témoin (sans engrais)	38,3
Toute la dose de superphosphate apportée au labour (100 kg de P_2O_5)	42,4
75 % au labour et 25 % en appoint	43,9
25 % au labour et 75 % en appoint	41,4

Il est efficace d'apporter de petites doses d'engrais phosphatés au semis. Le superphosphate, surtout granulé, apporté sur lignes à raison de 15 à 20 kg de P_2O_5 à l'hectare en même temps que les graines accroît fortement la récolte de coton brut. Ce procédé permet d'augmenter la teneur en acide phosphorique assimilable dans la

zone des jeunes racines, ce qui influe favorablement sur le développement du cotonnier. Il est recommandé d'apporter sur les lignes, en même temps que le superphosphate, de l'engrais azoté à la dose de 5 à 10 kg d'azote par hectare.

Les engrais potassiques sont apportés avant le semis en labour profond; à la phase de formation des boutons et au début de la floraison, en les enfouissant profondément pendant les travaux des interlignes.

Le coton répond bien à l'apport d'engrais organiques. Il est instamment recommandé de donner du fumier en fumure de fond. Cependant, sous les tropiques, il y en a peu, la période de maintien du bétail en étable étant courte. L'insuffisance de fumier dans les régions de culture irriguée du coton est déterminée également par le fait que le cotonnier ne donne, à l'exception des tourteaux, ni fourrage ni litière. Ceci influe sur le rapport entre la surface ensemencée et l'importance de l'élevage.

Les expériences d'Audry au Tchad ont mis en évidence l'influence extrêmement bénéfique du fumier sur la croissance du système radiculaire du cotonnier. Ceci permettait aux plantes d'assimiler les éléments nutritifs à partir de couches plus profondes du sol. Un autre moyen consiste à utiliser les tourteaux du cotonnier et des graines de cotonnier broyées comme engrais organique. Au Tchad, par exemple, l'apport de 400 kg de tourteaux ou de 1000 kg de graines de cotonnier broyées à l'hectare s'est montré très efficace. Au Cameroun, Lagière recommande d'apporter au cotonnier 5 à 10 t/ha de fumier (une poignée dans chaque poquet) ou 300 à 500 kg/ha de tourteaux de cotonnier, ou bien encore 500 à 1000 kg/ha de graines de cotonnier broyées, ou un engrais minéral à raison de 20 kg de N, 20 kg de S et 20 kg de P_2O_5 par hectare.

Si l'on dispose de suffisamment de fumier, pour obtenir de bonnes récoltes il faut le donner à raison de 20 t à l'hectare. On obtient des récoltes identiques ou même meilleures en apportant des doses modérées de fumier avec une petite quantité d'engrais minéraux.

On sait que, dans les sols tropicaux, le processus de nitrification est très intense. Il a pour résultat la formation de nitrates qui, avec le courant d'eau ascendant, remontent dans les couches superficielles du sol et le sol végétal s'appauvrit en azote. Ceci entraîne un affaiblissement de l'alimentation azotée du cotonnier. Si l'on ajoute une petite quantité d'engrais organique on crée les conditions d'une fixation temporaire de l'azote par les micro-organismes qui, en se décomposant après leur mort, rendent l'azote plus assimilable pour les plantes. Un bon effet est obtenu en apportant l'azote sous forme de nitrate d'ammonium et de tourteaux de cotonnier (tableau 68).

L'analyse foliaire est, sans doute, une des méthodes les plus rapides et les plus fiables pour déterminer les besoins du cotonnier en éléments nutritifs. Ceci s'explique par le fait qu'entre l'insuffisance d'un élément et sa teneur dans le limbe ou le pédoncule de la feuille il existe une dépendance étroite. En outre, l'apport au sol d'un cer-

Tableau 68

Influence des engrais azotés minéraux et des tourteaux de cotonnier sur la récolte de coton

Variante d'expérience	Récolte de coton brut, q/ha	Gain de récolte, q/ha	
		avec engrais minéraux	avec addition de matière organique
Sans fumure	14,0	—	—
Azote (100 % sous forme de nitrate d'ammonium)	22,8	8,8	—
Azote (75 % sous forme de nitrate d'ammonium et 25 % en tourteaux)	25,3	11,3	2,5
Azote (100 % sous forme de nitrate d'ammonium) + phosphore (sous forme de superphosphate)	23,4	9,4	—
Azote (75 % sous forme de nitrate d'ammonium et 25 % en tourteaux) + phosphore (sous forme de superphosphate)	26,4	12,4	3,4

Remarque : Azote et phosphore (P_2O_5) à raison de 60 kg/ha.

tain élément nutritif se manifeste d'ordinaire nettement dans son taux dans le limbe ou le pédoncule.

Par l'analyse foliaire des feuilles situées directement sous les fleurs, réalisée au cours des deux premières semaines de la floraison, Braud a établi les taux insuffisants, optimaux et excédentaires des éléments nutritifs pour le cotonnier (tableau 69).

Tableau 69

Taux des éléments nutritifs dans les feuilles du cotonnier en alimentation insuffisante, optimale et excédentaire

Elément nutritif	Taux de l'élément nutritif dans les feuilles (en % de matière sèche)		
	insuffisant	optimal	excédentaire
N	<4,0	4,0-4,4	>4,4
S	<0,3	0,3-0,4	>0,4
P	<0,2	0,3	>0,3 (surtout en déficience d'azote)

Pour déterminer le besoin des plantes en potassium au lieu du limbe il faut prendre, pour l'analyse foliaire, le pédoncule de la feuille, étant donné que sa teneur en potassium est un indice plus sûr de l'approvisionnement du cotonnier en cet élément.

Selon Bouchy, quand le cotonnier est approvisionné optimalement en éléments nutritifs, la teneur des pédoncules en potassium

est de 2,5 % de K, la teneur en azote, soufre et phosphore respectivement 3,5-3,6 % de N, 0,25 % de S et 0,25-0,3 % de P calculés sur la matière sèche.

Recommandations pour la fumure. Les doses d'engrais minéraux à apporter au cotonnier dépendent de l'intensité de sa culture. Dans la République Centrafricaine par exemple, avec une agrotechnique supérieure, on conseille d'apporter au cotonnier 44 kg de N, 23 kg de S, 38 kg de P_2O à l'hectare. Cependant, en culture traditionnelle, la dose d'engrais recommandée ne dépasse pas 21 kg de N, 20 kg de P_2O_5 à l'hectare.

Dans le nord du Bénin, avec l'agrotechnique existante, la dose d'engrais économiquement la plus efficace ne dépasse pas 12 kg de N, 14 kg de S et 40 kg de P_2O_5 (ou 60 kg de sulfate d'ammonium et 90 kg de superphosphate triple) à l'hectare. En même temps, avec un niveau d'agrotechnique supérieur on conseille ici d'apporter 21 kg de N, 23 kg de S et 67,5 kg de P_2O_5 (ou 100 kg de sulfate d'ammonium et 150 kg de superphosphate triple) à l'hectare.

Au niveau actuel de la culture du coton en Haute-Volta il est recommandé d'apporter sous le cotonnier 50 kg de sulfate d'ammonium et 75 kg de superphosphate triple. Ces doses d'azote et de phosphore peuvent être doublées à la condition d'un travail plus profond et meilleur de la terre.

Au Togo, avec les conditions existantes de l'agriculture il est actuellement recommandé d'épandre sous le cotonnier 50 à 100 kg de sulfate d'ammonium (10 à 21 kg de N et 11 à 23 kg de S) et 50 à 100 kg de superphosphate triple (22 à 45 kg de P_2O_5) à l'hectare. Mais avec un haut niveau d'agrotechnique, ces doses d'engrais peuvent être augmentées de beaucoup.

Nous donnons ci-dessous des recommandations pour la fumure du cotonnier dans certains pays d'Afrique occidentale.

Bénin. Les doses d'engrais ne sont pas les mêmes pour les différentes régions du pays. Dans le Nord, il est conseillé d'apporter au cotonnier 32 kg de N, 18 kg de S, 40 kg de P_2O_5 à l'hectare ; dans le Centre, 31 kg de N, 23 kg de S et 25 kg de P_2O_5 à l'hectare ; dans le Sud, 10 kg de N, 11 kg de S, 19 kg de P_2O_5 et 50 kg ed K_2O à l'hectare. Dans ce dernier cas, 50 jours après le semis il est nécessaire de donner comme fumure d'appoint une dose d'azote de 23 kg à l'hectare.

Côte d'Ivoire. La dose d'engrais recommandée par Bouchy de composition 20-20-15 représente ici 160 kg/ha en ajoutant 5 % de la fumure de fond. Il est également désirable de donner une fumure d'appoint d'urée à la dose de 50 kg/ha à la floraison.

Haute-Volta. Avec une agrotechnique relativement élevée il est recommandé ici d'apporter au cotonnier avant le semis ou au moment du semis 70 kg de phosphate d'ammonium, 30 kg de sulfate d'ammonium, 50 kg de KCl à l'hectare. 50 jours après le semis on donnera de l'urée en fumure d'appoint à la dose de 50 kg/ha. Au total, tout cela représente 42 kg de N, 37 kg de P_2O_5, 30 kg de K_2O et 7 kg de S

à l'hectare. Pour prévenir une déficience de bore il est encore désirable d'apporter 2,5 kg/ha de boracite.

Cameroun. Les données expérimentales montrent que, dans ce pays, il est désirable de donner en fumure de fond avant le semis 25 kg de N, 25 kg de P_2O_5, 20 kg de K_2O et 7 kg de S par hectare. Avec une bonne agrotechnique il faut ajouter 50 kg/ha d'urée comme fumure d'appoint.

Selon Braud, la teneur critique en bore des limbes foliaux est de 15 mg/g de matière sèche. Afin d'éviter ou pour éliminer une déficience de bore il est recommandé d'ajouter 1 % de B_2O_3 dans la fumure de fond de composition NSPK.

Mali. A Kogoni, en culture irriguée du coton il est conseillé d'apporter chaque année 250 kg d'urée (115 kg de N) et 200 kg de superphosphate triple (90 kg de P_2O_5) à l'hectare. En culture non irriguée on apportera 21 à 30 kg de N, 11 à 23 kg de S, 50 à 67,5 kg de P_2O_5 à l'hectare. En culture irriguée du coton, de bons résultats sont obtenus par un apport d'oligo-éléments composés de zinc, de cuivre, de fer, de manganèse et de soufre.

Nigeria. Comme recommandation préalable pour ce pays, il est admis d'apporter au cotonnier 50 kg de sulfate d'ammonium et 100 kg de phosphate d'ammonium (soit 30 kg de N, 11 kg de S, 50 kg de P_2O_5) ou 100 kg de sulfate d'ammonium et 50 kg de superphosphate triple (soit 21 kg de N, 23 de S et 23 kg de P_2O_5) à l'hectare.

Sénégal. Les doses d'engrais recommandées ne sont pas les mêmes pour toutes les régions du Sénégal. A Siné Saloum et dans les régions orientales: 20 kg de N, 48 kg de P_2O_5 et 20 à 30 kg de K_2O à l'hectare. Dans les autres régions on conseillera à l'hectare 400 kg

Tableau 70

Doses d'engrais recommandées pour la culture du coton au Togo (kg/ha)

Engrais	Littoral	Plateau et centre	Kara et savane
Sulfate d'ammonium	50 (10 N, 11 S)	50 (10 N, 11 S)	50 (10 N, 11 S)
Urée (50 jours après le semis)	50 (23 N)	50 (23 N)	50 (23 N)
Superphosphate concentré	50 (22 P_2O_5)	—	—
Phosphate d'ammonium	—	50 (10 N, 25 P_2O_5)	100 (20 N, 50 P_2O_5)
Chlorure de potassium	100 (60 K_2O)	50 (30 K_2O)	50 (30 K_2O)
Boracite	2,5 (1,5 B_2O_3)	2,5 (1,15 B_2O_3)	2,5 (1,15 B_2O_3)

Remarque : Entre parenthèse l'élément nutritif en kg/ha.

de phosphate tricalcique pendant la mise en jachère du sol et on apportera, avant le semis, 23 kg de N et 50 kg de K_2O et autant que possible, en supplément, 23 kg de N en fumure d'appoint à la floraison.

Togo. Le tableau 70 donne les recommandations pour l'emploi des engrais dans les différentes régions de ce pays.

République Centrafricaine. La dose d'engrais dépend de la région où le cotonnier est cultivé. Ainsi, pour les régions occidentales du pays, Braud conseille 32 kg de N et 12 kg de S ; pour les régions orientales, 33 kg de N et 20 kg de P_2O_5 ; pour le Centre, 32 kg de N, 12 kg de S et 20 kg de P_2O_5 par hectare. Avec une agrotechnique adéquate, dans les régions centrales du pays les doses d'engrais minéraux sous le cotonnier peuvent être augmentées environ jusqu'à 44 kg de N, 23 kg de S et 38 kg de P_2O_5 à l'hectare.

Tchad. Pour le cotonnier, Mégie et autres proposent un programme de fumure reposant sur N, P et S dans la proportion 3:2:1.

Il est recommandé d'apporter à chaque hectare 100 kg d'un mélange d'engrais composé d'urée (46 %), de phosphate d'ammonium (44 %), de soufre (10 %). La teneur de ce mélange en N, P_2O_5 et S est respectivement de 30, 20 et 10 %. Ces doses d'engrais devront alterner avec des doses de N de 25-27 kg ; de P_2O_5, de 15 à 18 kg ; de K_2O, de 0 à 12 kg ; de S, de 5,6 à 6 kg à l'hectare en associant au mélange NSPK de 0,7 à 0,8 % de B_2O_3 dans le cas d'une insuffisance de bore.

LES CULTURES FRUITIÈRES

Le bananier

Le bananier occupe de vastes superficies dans de nombreux pays d'Asie, d'Afrique et d'Amérique latine. La récolte mondiale de bananes est estimée, par les experts de la FAO, à 32-40 millions de tonnes par an.

Pour des dizaines de millions d'habitants des zones tropicales et, en partie, subtropicales, la banane est un des principaux produits alimentaires. Dans certaines régions d'Afrique, l'Ouganda et le Cameroun, par exemple, la consommation annuelle de bananes atteint 200 à 300 kg par habitant.

En même temps, la banane est une des principales cultures d'exportation. Cependant, dans la plupart des Etats africains, la majeure partie de la récolte est consommée sur place. Ces dernières années seulement d'importants chargements de bananes sont parvenus de Côte d'Ivoire, de Cameroun, de Somalie, de Guinée, de Sierra-Leone, de Nigeria sur le marché européen du fruit.

Le bananier est assez exigeant envers la réaction du sol. Le pH qui lui convient le mieux est dans les limites de 5,8-6,2. A des pH inférieurs, il faut un apport de chaux.

Le bananier est très exigeant envers la présence de substances nutritives assimilables dans le sol, surtout dans la couche supérieure. Ceci s'explique par la croissance luxuriante et rapide de sa partie aérienne et par son système radiculaire à profondeur relativement peu importante. En outre, la culture du bananier se fait d'habitude sur le même terrain de nombreuses années de suite et elle exporte du sol une quantité importante de substances nutritives. C'est ce dont témoignent les données de Bonfill obtenues en Côte d'Ivoire (tableau 71).

Tableau 71

Exportation de substances nutritives (kg/ha) par la banane pour une récolte de fruits de 30 t/ha

Parties de la plante	N	P_2O_5	K_2O
Tiges	29	11	92
Feuilles	191	42	380
Régimes	64	19	164
Total	284	72	636

Les valeurs mentionnées sont importantes en comparaison de l'exportation des substances nutritives correspondantes par d'autres cultures fruitières et agricoles. Un prélèvement élevé de potassium attire particulièrement l'attention.

En Afrique occidentale, le facteur limitant la croissance et le développement et, par là même, la récolte de bananes est le plus souvent une déficience d'azote dans le sol. L'insuffisance d'azote réprime la formation de l'appareil foliaire, celle des rejets et fait diminuer le nombre des fruits dans les régimes. Le bananier absorbe intensément l'azote pendant toute la vie de la plantation. Même la variété naine *Cavendish* absorbe, au moment de sa maturité, environ 90 g d'azote par pied ou 225 kg à l'hectare, dont un tiers est absorbé déjà à la phase de cinq feuilles.

Le bananier réclame assez peu de phosphore en comparaison de ses besoins d'azote et de potassium. C'est pourquoi le phosphore limite rarement la croissance des plantes, bien que l'apport d'un engrais phosphaté donne souvent de beaux gains de récolte. Sur les sols acides caractérisés par une basse teneur en phosphore assimilable, on constate également une augmentation notable de la récolte de bananes par un apport d'engrais phosphaté. Aussi, pour obtenir de bonnes récoltes sur de tels sols, faut-il se soucier de donner aux plantes suffisamment de phosphore. Comme le remarque Hardy, dans les sols argileux, la teneur en phosphore assimilable suffisante pour le bananier varie entre 8,5-10,0 mg/100 g de sol.

L'absorption la plus intense de phosphore par le bananier a lieu dans la période de croissance végétative, commence 2 ou 3 mois après la plantation et se poursuit jusqu'au début de la floraison. Le

phosphore des engrais devient donc le plus efficace lorsqu'il est apporté de bonne heure.

Dans la carence en phosphore, les feuilles du bananier deviennent vert foncé avec un reflet bleuâtre ou bronzé. Un autre signe de carence en phosphore est la nécrose marginale des plus vieilles feuilles, nécrose qui se propage rapidement sur la feuille jusqu'à sa nervure médiane.

Le bananier exige beaucoup de potassium. Cet élément est absorbé par les plantes avec une intensité qui est fonction de la période de végétation. Dans les expériences de Martin-Prevel, par exemple, les plantes de la variété *Cavendish* absorbaient 116 g de K_2O à la phase d'apparition de cinq feuilles, 300 g à la phase de 15 feuilles et 415 g au moment de la maturation (du nombre, 150 g dans le régime). Traduite à l'hectare, l'exigence en potassium à ces phases représente respectivement 290, 750 et 1040 kg de K_2O. Le potassium améliore la taille et la qualité des fruits, augmente leur teneur en glucides.

Etant donné l'absence de fumier sous les tropiques, les besoins du bananier en éléments nutritifs doivent être satisfaits par la sidération et surtout, par les engrais minéraux. La culture de l'engrais vert n'est possible, cependant, que dans l'année de la mise en place de la plantation, car, les années suivantes le sol est fortement ombragé par les bananiers. La quantité nécessaire d'éléments nutritifs ne sera donc apportée dans la suite qu'avec les engrais minéraux.

Remarquons, cependant, que dans les plantations de bananiers on ne s'est pas servi d'engrais pendant longtemps, car on utilisait des sols très fertiles recouverts de végétation naturelle qui, une fois épuisés, étaient tout simplement abandonnés. Un tel système était largement employé par les planteurs, surtout en Afrique. Un apport plus ou moins systématique d'engrais minéraux et, en même temps, l'étude de leur efficacité n'ont été entrepris que dans les années 30. Il s'est avéré que l'apport d'engrais minéraux non seulement augmentait fortement la récolte, mais faisait aussi baisser le prix de revient.

Les engrais azotés influent fortement sur la récolte des fruits. Mais en climat tropical l'azote minéral subit, dans le sol, une nitrification rapide et est lessivé du sol végétal. Il n'est donc pas étonnant que sur la plupart des sols la récolte croît proportionnellement aux doses d'engrais azotés si seulement d'autres facteurs ne la limitent pas. C'est ce que montrent nettement, entre autres, les données obtenues par Bulter sur les riches terres alluvionnaires du Honduras (tableau 72).

L'efficacité des engrais azotés est manifestement plus élevée sur les sols encore plus pauvres en cet élément, surtout les sols latéritiques. Au Nigeria et au Zaïre, sans apport d'engrais, les récoltes baissent fortement même la seconde année après la plantation. Dans de tels cas, le gain de récolte par 1 kg d'azote apporté peut dépasser 100 à 150 kg de fruits.

Tableau 72

Influence des engrais azotés sur la récolte de bananes

Dose d'azote kg/ha	Récolte, t/ha		Masse du régime, kg	
	Région de Mopala	Région de Guarama	Région de Mopala	Région de Guarama
0	26,6	15,4	39,2	30,1
70	32,3	17,8	43,4	32,7
140	34,3	22,0	45,3	35,7
210	38,1	23,7	46,0	37,0

Le bananier réclame beaucoup de potassium et la faible teneur de nombreux sols tropicaux en cet élément rend impossible ici de bonnes récoltes sans recours à des engrais potassiques. Dans les sols d'Afrique occidentale, par exemple, c'est souvent le potassium qui est au minimum. Comme l'indique Dumas, dans cette zone, beaucoup de terres sont assez riches en azote, mais pauvres en potassium.

Pourtant, sur les jeunes sols alluvionnaires de Guinée ayant un taux de phosphore mobile de 10 à 20 mg/100 g on ne constate pas un grand effet des engrais potassiques. Mais dans les exploitations paysannes où les plantations de bananiers fructifient jusqu'à 30 à 50 ans, les signes de carence en potassium se manifestent souvent.

Pour obtenir une récolte de 25 à 35 t/ha de régimes de bananes sur les sols sablonneux légers de Côte d'Ivoire pauvres en éléments fertilisants il faut apporter chaque année 1,5 à 2 t/ha de calcaire dolomiteux. On poursuivra l'apport de cet engrais jusqu'à ce que la teneur du sol en Ca et Mg atteigne respectivement 4-5 et 1-2 mEq pour 100 g de sol. Dans la suite, la dose de calcaire dolomiteux pourra être réduite à 1 t par an. On conseillera de ne donner ici l'engrais phosphaté que pendant la première année sous forme de laitier basique à raison de 1 t/ha. Dans la suite, on n'apportera du phosphore qu'à chaque nouvelle mise en place de plantation. Les normes d'engrais azotés et potassiques dépendent du volume de la récolte et constituent respectivement 300 à 400 kg de N, 400 à 800 kg de K_2O à l'hectare par an.

En République de Guinée, Dumas conseille d'apporter chaque année 150 à 180 g de N, 90 g de P_2O_5, 225-270 g de K_2O, 105-130 g de CaO et 80-105 g de MgO par pied. On peut satisaire le besoin de calcium et de magnésium des bananiers par l'apport de calcaire dolomiteux. L'épandage abondant de matière organique est également très efficace.

Au Sénégal, sur les plantations irriguées Croon recommande un apport annuel de 160 g de N, 120 g de P_2O_5, 270 g de K_2O et 50 g de MgO par bananier.

Au Cameroun, sur des plantations de bananiers à la densité de 2 500 plantes à l'hectare il est recommandé de donner chaque année 80 g de N, 60 g de K_2O par plante.

En République Sud-Africaine, les plus grandes récoltes de bananes sont obtenues avec un apport annuel de 150 g de N, 200 g de P_2O_5 et 150 g de K_2O par plante.

Pour la Mozambique, Monteiro Marques conseille 200 kg de N, 50 à 200 kg de P_2O_5 et 200 à 600 kg de K_2O à l'hectare.

Aux Canaries, Champion et Monnet proposent, dans les plantations à densité de 1 600 bananiers à l'hectare, d'apporter à chaque plante 425 g de N, 135 g de P_2O_5 et 600 g de K_2O, soit 700 kg de N, 220 kg de P_2O_5 et 960 kg de K_2O à l'hectare.

La grande exigence du bananier en azote est satisfaite au mieux par un apport fractionné de la norme entière d'engrais par petites doses, toutes les 4 à 6 semaines. Dans le cas du potassium et du phosphore, il suffit d'apporter en deux fois toute la dose d'engrais. Il est important de donner la première dose d'engrais au moment de la mise en place ou aussitôt après la plantation. Sur les jeunes plantations de bananiers, les engrais seront épandus et enfouis dans le sol autour de chaque pied à une distance de 1 m de la tige. On veillera à ce que l'engrais ne vienne pas directement en contact avec les tiges qui sont très sensibles aux sels. Pour la même raison, on ne pulvérisera pas les jeunes bananiers par des solutions d'engrais minéraux.

Sur les plus vieilles plantations, où les plantes ont déjà des racines bien développées, on peut apporter les engrais en couverture. Sur ces plantations, la fumure d'appoint par les feuilles est également permise. A cette fin, on utilisera de préférence des solutions d'engrais hautement concentrées renfermant plus de 40 % d'azote.

Dans certaines régions de culture de la banane, on constate parfois des maladies causées par une pénurie d'oligo-éléments. Sur des sols à pH 6,0 et plus, on observe parfois une carence en zinc suivie d'éclaircissement des feuilles, d'apparition de taches jaunes, de déformation des feuilles et des fruits. On conseille, dans ce cas, une pulvérisation des plantes avec une solution à 1 % de sulfate de zinc. Dans certains cas, on a affaire à la chlorose et à la bigarrure des feuilles dues à une déficience de manganèse. Cette maladie s'accompagne quelquefois d'une déformation des feuilles et de la petitesse des fruits. La déficience de manganèse s'observe sur les sols calcaires et sur les sols alcalins. Pour y mettre fin, il peut être recommandé d'apporter des engrais au manganèse, des boues manganésiennes ou de pulvériser les plantes avec les composés correspondants du manganèse.

L'ananas

Les plantations d'ananas sont ordinairement mises en place sur des sols sablonneux, des limons sableux, des sols latéritiques ou tourbeux. Les sols argileux lourds conviennent moins bien à la culture

de l'ananas. Dans tous les cas, les terres doivent avoir une couche arable profonde et être bien drainées, car l'ananas ne supporte pas l'eau stagnante.

Les ananas préfèrent les sols acides. Certaines variétés poussent et se développent normalement sur des sols à pH de 5,6 à 6,0. Les mêmes variétés peuvent aussi être cultivées sur des sols à pH atteignant 7,5, mais à condition de bien contrôler une déficience possible de fer et de l'éliminer en pulvérisant régulièrement les feuilles au moyen d'une solution de sulfate de fer. D'autres variétés sont moins bien adaptées à des sols à réaction neutre et, pour cette raison, ne poussent et ne se développent normalement, en donnant de bonnes récoltes, que sur des sols à pH atteignant 4,5 à 5,5.

L'ananas est hautement productif et cela en fait une des cultures les plus exigeantes en substances nutritives. En même temps, le système radiculaire de l'ananas s'étend principalement dans la couche superficielle du sol de 0 à 30 cm et n'est donc pas capable d'utiliser les réserves de substances nutritives des couches plus profondes. Si la couche superficielle du sol ne renferme pas suffisamment de substances nutritives, les plantes formées sont très faibles et portent des fruits de mauvaise qualité marchande.

Avec une densité de 37000 plantes à l'hectare, l'ananas exporte du sol 150 kg de N, 120 kg de P_2O_5, 600 kg de K_2O, 160 kg de CaO et 100 kg de MgO. Par conséquent, l'ananas réclame beaucoup d'éléments nutritifs, surtout d'azote et de potassium.

Comme l'ananas emporte une grande quantité de substances nutritives et que le sol s'appauvrit, une culture commerciale de l'ananas n'est pas possible sans apport systématique d'engrais. Sans eux, les récoltes tombent au bout de 2 ou 3 ans, même sur les terres les plus fertiles. Dans les régions de forte pluviométrie, le lessivage des éléments nutritifs à partir des horizons supérieurs du sol a également beaucoup d'importance.

Les engrais azotés exercent le plus d'influence sur la formation de la récolte, la couleur et la composition du jus d'ananas. L'importance des engrais azotés est exceptionnelle sur tous les types de sols, sauf les terres vierges. L'azote agit avant tout sur le développement et l'activité de l'appareil assimilateur et crée, par conséquent, les conditions nécessaires à la formation d'un fruit normal. En pénurie de cet élément, le nombre et les dimensions des feuilles diminuent, elles vieillissent prématurément. Elles prennent une couleur pourpre anormale, l'intensité de la photosynthèse tombe brusquement, les fruits sont petits, la formation de rejetons est inhibée.

Sous l'influence des engrais azotés, les dimensions des plantes et des fruits augmentent (tableau 73).

Mais l'emploi d'engrais azotés à eux seuls, surtout à fortes doses, peut exercer un effet négatif, nuire à la couleur de la chair et de la peau du fruit en réprimant la formation des pigments. On évitera ces inconvénients si les engrais sont apportés en veillant à l'équilibre de tous les éléments fertilisants.

Tableau 78

Influence de l'engrais azoté sur l'ananas
(Teiwes et Grüneberg)

Dose de N par plante (g)	Masse moyenne du fruit (g)	Diamètre de l'axe de l'inflorescence (mm)	Hauteur de la plante (cm)	Teneur moyenne du fruit en acides (mEq)	Rapport entre la teneur en acides et la teneur en sucres
0	1092	19,2	35,94	9,63	1,5
4	1531	20,6	41,94	8,80	1,6
8	1701	21,6	44,48	8,37	1,7

L'engrais azoté le plus efficace pour l'ananas est le sulfate d'ammonium physiologiquement acide. C'est seulement sur les sols très acides que l'on peut utiliser le nitrate d'ammonium ou le nitrate d'ammoniac calcique.

Il est très important de tenir compte non seulement de la forme et de la dose des engrais azotés, mais aussi du moment de leur apport. Ceci s'explique par le fait que l'efficacité des engrais azotés varie suivant les phases de croissance et développement de l'ananas. Aux phases tardives, après la formation de la rosette et de l'inflorescence, les fumures d'appoint azotées n'agissent déjà plus sur les dimensions des plantes, mais peuvent stimuler la croissance des rejetons latéraux. C'est la raison d'un apport fractionné des engrais azotés, 3 à 5 fois par cycle. Un tel apport des engrais azotés réduit leurs pertes et rend plus efficace leur utilisation.

L'ananas a besoin de petites doses de phosphore. Mais un excès de phosphore et une diminution du rapport N:P entraînent une baisse de récolte. Des doses relativement élevées de phosphore utilisées dans les plantations s'expliquent, en premier lieu, par le fait que beaucoup de sols tropicaux le fixent fortement. Il est rationnel, dans ces cas, d'utiliser les formes d'engrais granulées et de les apporter en plusieurs reprises.

Si, en comparaison de l'azote et du potassium, le phosphore n'est nécessaire qu'en moindres quantités, l'exigence de l'ananas en potassium est exceptionnellement élevée. Tout comme l'azote, le potassium détermine le rendement de l'ananas; en outre, on a constaté une certaine influence mutuelle entre ces substances. Le potassium peut, à un certain point, éliminer l'influence négative de l'azote sur la qualité des fruits. En même temps, les engrais azotés ne sont efficaces que si la plante reçoit suffisamment de potassium. On a découvert que l'absorption du potassium par les racines est facilitée quand l'azote est représenté par des nitrates contrairement aux ions ammonium.

Dans la majorité des cas, les engrais potassiques ont une action bénéfique aussi bien sur la quantité que sur la qualité de la récolte.

Sous l'influence des engrais potassiques les dimensions et la masse des fruits s'accroissent, leur teneur en acides augmente, les fruits supportent mieux les transports et le stockage. Des expériences en Afrique ont montré que le taux du potassium s'abaissait à des niveaux critiques dès la fin du premier cycle; au troisième cycle, sans apport d'engrais potassiques, la fructification n'avait pas lieu. L'accumulation maximale de potassium, de même que d'azote et de phosphore, a lieu à la période de maturation des fruits. Sous un climat plus aride, où le lessivage des éléments nutritifs est moins prononcé, les signes de carence en potassium apparaissent ordinairement plus tard. Certains sols alluvionnaires en sont un exemple; il suffit, sur eux, d'apporter des doses modérées d'engrais potassiques pour obtenir une bonne récolte.

Le sulfate de potassium est la forme la plus efficace d'engrais potassiques. Quand on se sert de chlorure de potassium, les ions chlore exercent une influence néfaste sur l'absorption du potassium et la croissance de l'ananas. On a remarqué que le potassium réduit la durée de la période entre le début de la floraison et la récolte, alors que le calcium la prolonge.

On a souvent noté, dans différents pays, des troubles physiologiques de l'ananas dus à la déficience de plusieurs autres éléments nutritifs. En Afrique occidentale la pénurie de zinc n'est pas rare. D'après Stein, le taux minimal admissible de zinc dans les feuilles est de 44 mg/kg. Au-dessous de ce niveau apparaissent les premiers signes carentiels. Pour les éviter, on procède à des fumures d'appoint par les feuilles au moyen de sulfate de zinc à la concentration de 0,5-1,4 %. Sinon, sur bien des sols divers, il serait impossible d'obtenir des récoltes normales.

La chlorose provoquée par déficience de fer est souvent un sérieux problème dans les plantations d'ananas. Pour la combattre on pulvérise les plantes au sulfate de fer. Dans les jeunes plantations, cela se fait tous les quinze jours. Généralement, l'apport au sol d'engrais adéquats est peu efficace, car le fer se trouve fixé sous une forme non assimilable.

L'insuffisance d'autres éléments est plus rare. Le calcium et le magnésium n'exercent sur l'ananas qu'une action principalement indirecte, en entravant l'absorption du potassium. Les expériences de Martin-Prevel ont montré que la proportion suivante entre les cations (en %): K — 30 à 60, Mg — 30 à 65, Ca — 0 à 17 est la meilleure.

Quand le sol est riche en calcium, l'absorption des deux autres cations se ralentit. Il est parfois nécessaire d'apporter aussi des engrais magnésiens, mais ils ne sont pas largement utilisés pour l'instant.

Le diagnostic de l'alimentation minérale de l'ananas, comme d'autres plantes pluriannuelles, présente des difficultés spécifiques. Certaines expériences ont montré que la teneur du sol en formes échangeables d'éléments nutritifs ne donne qu'une idée approximative

de l'approvisionnement des plantes en ces éléments. Ceci concerne principalement les éléments facilement lessivés des horizons supérieurs du sol à la période des pluies.

Le diagnostic *de visu*, bien que simple, laisse tout de même à désirer. En champ, il est rarement possible d'observer les symptômes de déficience ou d'excès d'un élément donné à l'état pur.

L'analyse foliaire largement répandue aujourd'hui pour juger de l'état de l'alimentation minérale des plantes fruitières semble prometteuse dans la culture de l'ananas. Beaucoup de recherches faites en Afrique occidentale sont là pour le prouver. Elles ont permis d'établir les niveaux critiques du taux des principaux éléments dans les feuilles. Pan estime que les intervalles suivants sont optimaux: pour N — 1,5-2,0 % ; pour P_2O_5 — 1-0,2 % ; pour K_2O — 3,5-4,0 %. L'analyse foliaire permet aussi de contrôler l'exactitude des proportions entre les divers éléments. Les meilleures récoltes et les meilleures qualités de fruits étaient obtenues, par exemple, avec une proportion du calcium et du phosphore de 12-14:1 dans les feuilles physiologiquement actives.

Néanmoins, la base de la mise au point d'un système de fumure repose pour l'instant sur les expériences en champ sur les divers types de sols. Elles permettent non seulement de tirer au clair les doses limites de divers éléments, mais aussi d'établir le rapport optimal entre eux. Ces expériences sont actuellement poursuivies dans beaucoup de pays.

Les résultats des expériences sur les engrais ont montré la grande importance du rapport des éléments fertilisants entre eux. Par exemle, une récolte maximale a été obtenue au Brésil en apportant 120 kg de N, 60 kg de P_2O_5 et 60 kg de K_2O, alors que des doses doubles d'engrais potassiques et phosphatés n'influent pas sur le rendement.

Les doses optimales d'azote dépendent de la façon dont les plantes sont pourvues en autres éléments. Sur les sols pauvres en potassium, l'augmentation des doses d'engrais azotés ne produit pas l'effet recherché. Au contraire, sur les sols riches en potassium, des engrais azotés augmentent fortement la récolte.

L'action des engrais potassiques se manifeste le mieux sur des sols pauvres en cet élément. Sur des sols riches en potassium échangeable l'apport d'engrais potassiques n'exerce souvent aucun effet sur la première récolte. Cependant, par la suite, l'apport d'engrais potassiques est nécessaire, car après la première récolte la teneur du sol en cet élément baisse fortement.

Les engrais phosphatés agissent sur la croissance et le rendement de l'ananas sur tous les types de sols.

L'utilisation des éléments fertilisants des engrais par l'ananas dépend du moment de leur apport et de leur dose, du régime des pluies, des propriétés du sol et d'autres facteurs. Mais dans l'ensemble, pour l'ananas, cette utilisation est beaucoup plus élevée que pour les autres cultures fruitières. Les expériences de IFAC ont montré que lorsqu'on donne N, P et K en quantités respectivement de 200, 45,

374 kg/ha, presque la moitié de l'azote (92 kg) et du potassium (180 kg) est employée à la formation des fruits et des rejetons latéraux. Le phosphore est moins utilisé (14 kg sur 45).

L efficacité des engrais augmente avec un plan correct des formes et des doses d'engrais, des dates de leur apport, compte tenu des conditions locales. Prenons pour exemple les recommandations pour la Guinée. Deux systèmes y sont mis au point pour l'emploi des engrais suivant l'orientation de la culture de l'ananas : l'un pour les fruits de conserve, l'autre pour les fruits exportés tels quels. Dans le premier cas, les doses d'azote et de potassium sont égales (4 g par pied plus 2 g de P_2O_5). Dans le second, on apporte près de trois fois plus de potassium que d'azote et quatre fois plus que de phosphore (respectivement 3, 2 et 8 g). Sur certaines plantations on ne donne les engrais phosphatés que lorsque l'analyse foliaire décèle une déficience de phosphore.

Ordinairement, les engrais sont donnés en fumure d'appoint en deux fois. La première dose au cours des trois premiers mois de croissance et de développement ; la seconde est donnée en couverture dans la période entre 6 et 9 mois après la mise en place. Pendant les trois mois qui précèdent l'apparition des inflorescences, on évitera de donner des engrais. Autrement, la floraison et la fructification seraient retardées.

Etant donné le faible développement du système radiculaire de l'ananas on épandra les engrais minéraux le plus près possible des plantes, dans la zone d'extension de leurs racines. Sur les jeunes plantations, les engrais sont épandus à la volée autour de chaque jeune plante ; dans les plantations plus vieilles, sur les feuilles inférieures des plantes, de façon que la pluie entraîne les éléments nutritifs directement dans le sol. L'apport des engrais en couverture sur toute la surface de la plantation fait baisser leur efficacité, les plantes n'utilisant pas entièrement les éléments nutritifs.

Pour l'ananas Jacob et Uexküll recommandent les doses moyennes suivantes d'engrais minéraux : 130-200 kg/ha de N, 65 à 100 kg/ha de P_2O_5, 130 à 200 kg/ha de K_2O. Ceci représente 650 à 1000 kg/ha de sulfate d'ammonium, 350 à 550 kg/ha de superphosphate et 250-400 kg/ha de sulfate de potassium (50 % de K_2O). Afin de ne pas nuire à la fertilité du sol et pour obtenir des plantes fortes et hautement productives, les engrais organiques sont également nécessaires. Ils sont surtout efficaces quand on recultive l'ananas sur le même champ. Souvent, lorsqu'on n'utilise en qualité d'engrais organiques que les déchets des plantations d'ananas, on constate la dégradation et l'érosion du sol. Aussi, pour une culture intense de l'ananas une condition importante de bonnes récoltes est-il l'emploi d'engrais vert (sidération), étant donné que, sous les tropiques, il n'y a pas ou très peu de fumier. De bons résultats sont fournis par la culture de *Vigna sinensis, Crotalaria juncea, Mucuna Deeringiana* et de différents lupins comme sidération entre deux périodes de culture de l'ananas.

Le manguier

Le manguier répond bien à une fumure régulière d'azote, de phosphore et de potassium. Mais la plupart du temps, en pratique, le manguier n'est pas fumé. D'après Singh, le manguier exporte du sol avec une récolte de 1000 kg de fruits: 1,23 kg de N; 0,60 kg de P_2O_5; 2,14 kg de K_2O; 0,91 kg de CaO et 0,52 kg de MgO.

Lorsque le sol a une teneur en azote élevée et qu'il est régulièrement arrosé, la croissance végétative des arbres ne porte plus un caractère uniforme et la formation des fruits se trouve arrêtée. D'où la grande importance d'une juste proportion de l'azote, du potassium et du phosphore entre eux. Néanmoins, on ne connaît encore que peu de chose sur l'influence exercée par les divers éléments nutritifs sur la formation du fruit du manguier.

Comme le font savoir Jacob et Uexküll, les engrais azotés et potassiques doivent toujours être apportés ensemble. En outre, pour stimuler la croissance des jeunes arbres il faut leur donner de plus fortes doses d'azote et, autant que possible, sous la forme d'engrais organiques. Mais dans la fumure des arbres portant des fruits, le phosphore et le potassium doivent prévaloir sur l'azote. Avant de planter un manguier on place dans chaque fosse 4,5 à 5,4 kg de compost et 2,3 à 3,2 kg de superphosphate ou de farine d'os.

Dans une grande mesure, les doses d'engrais minéraux pour le manguier sont déterminées par l'âge de l'arbre. Sur les jeunes plantations ne fructifiant pas encore, Jacob et Uexküll conseillent de donner en moyenne 50 à 250 g de N, 0 à 90 g de P_2O_5 et 50 à 125 g de K_2O par arbre. Sur les plantations donnant des fruits, les doses seront plus élevées: 225 à 300 g de N, 75 à 150 g de P_2O_5 et 250 à 375 g de K_2O par arbre.

Le système de fumure des vergers producteurs doit tenir compte de la périodicité de la fructification. La quantité d'engrais, surtout azotés, doit donc augmenter dans une année de bonne récolte et diminuer dans une année de mauvais rendement pour ne pas stimuler une croissance végétative déjà forte par elle-même. Les engrais azotés sont particulièrement efficaces après la cueillette d'une bonne récolte quand une déficience d'azote dans les arbres est possible.

Les dates de l'apport des engrais doivent concorder avec les phases du cycle annuel des arbres qui, à leur tour, sont déterminées par la dynamique des facteurs climatiques. En Guinée, on conseille de donner un appoint de NPK en mai-juin; de NK en octobre. Au Congo, les engrais sont apportés en trois fois: à la phase d'apparition des inflorescences (NK), après la floraison (NPK), au début de la saison des pluies (engrais organiques).

Dans tout les cas, il est désirable d'apporter les engrais quand le sol est suffisamment humide. Il faut les répartir sur toute la surface du système radiculaire sans se contenter d'un cercle autour du tronc, comme c'est souvent le cas.

Dans certains pays, on a découvert ces dernières années dans le

manguier une déficience de certains oligo-éléments, surtout cuivre, zinc, manganèse et bore. Le meilleur moyen d'éliminer la pénurie d'oligo-éléments est de pulvériser le feuillage des arbres avec des solutions de sels correspondants.

Si la réaction du sol est inférieure à pH 5,5 il faut apporter de la chaux.

Le dattier

Pour obtenir une récolte abondante de dattes d'une bonne qualité, une fumure est nécessaire. Cependant, on ne fait actuellement que commencer à apporter des engrais minéraux aux dattiers dans les principales régions de leur culture, ou bien même, ils ne sont pas utilisés, car ils sont peu accessibles à de petites exploitations paysannes. On se sert parfois d'engrais organiques, surtout du fumier. Dans les pays où le dattier est cultivé depuis l'antiquité, le fumier est épandu à peu près tous les 2 ou 3 ans en surface ou enfoui en sillons creusés autour des palmiers. Si les sols ont tendance à former une croûte superficielle, ce qui est souvent le cas en culture irriguée ou s'il y a danger d'accumulation de sels dans le sol, le fumier est surtout utilisé comme mulching.

Les besoins d'éléments nutritifs du dattier dépendent des conditions concrètes de l'endroit de sa plantation. D'après Jacob et Uexküll, le dattier exporte d'un hectare environ 30 kg de N, 20 kg de P_2O_5 et 50 kg de K_2O. Dans les vieilles cultures, l'action des engrais ne se manifeste souvent pas immédiatement, mais seulement plusieurs années après leur apport. Néanmoins, un sol dont les éléments nutritifs sont bien équilibres favorise, dans tous les cas, la croissance et le développement de palmiers sains. Quand on utilise des engrais minéraux il faut faire attention, autant que possible, à ne pas employer de chlorures et veiller à arroser abondamment pour que le sol ne se sale pas. Il est recommandé d'apporter les engrais phosphatés avec les composts. Pour le dattier, Jacob et Uexküll conseillent les doses moyennes suivantes d'engrais minéraux calculées par palmier: 450 à 900 g de N, 610 à 810 g de P_2O_5, 230 à 450 g de K_2O. Ceci correspond à 2,3-4,5 kg de sulfate d'ammonium, 3,4-4,5 kg de superphosphate et 0,4-0,9 kg de sulfate de potassium.

LES CULTURES CÉRÉALIÈRES

Le riz

Il existe plusieurs procédés de culture du riz. Tous sont réunis en deux groupes: la culture sèche et la culture submergée. Plus le 90 % des rizières au monde sont occupées par le riz inondé.

En Afrique occidentale, le riz est cultivé en submersion sur les marécages et les terres marécageuses, sur les terres inondées par les

crues des fleuves et des lacs, sur les mangroves du littoral atlantique en irrigation artificielle.

Pour une récolte de 10 quintaux de grain le riz consomme environ 25 kg d'azote, 16 kg de P_2O_5, et 25 kg de K_2O. Le riz assimile avec une intensité particulière les substances nutritives aux phases du tallage et de la montée (tableau 74).

Tableau 74

Dynamique d'absorption de l'azote et du phosphore par le riz sur sol de prairie châtain
(en % du maximum, d'après A. Touline)

Phase de croissance et de développement	N	P_2O_5
Levée	4,3	2,3
Tallage	31,8	15,0
Montée	72,6	81,5
Début du stade laiteux	92,6	97,5
Stade laiteux-pâteux	99,5	100,0
Maturité complète	100,0	88,6

Sur sol submergé, sous le riz, ce sont les processus réducteurs qui prédominent sur les processus oxydateurs, l'alcalinité est supérieure à la moyenne, le taux des formes échangeables de fer, de manganèse, de phosphore et de matière organique est élevé.

Le *régime de l'alimentation azotée* du riz est bien étudié, et, dans ce domaine, un grand nombre de données concrètes ont été rassemblées. En raison de la prédominance des processus réducteurs, la forme dominante d'azote minéral dans le sol est celle de l'ammonium qui dépasse le taux de l'azote nitrique dès le début de la submersion. Vers la fin de la végétation, elle devient la seule forme minérale de cet élément.

La grande mobilité des nitrates, ainsi que leur faculté de se réduire jusqu'à l'azote libre par dénitrification, entraîne de lourdes pertes d'azote dans le champ inondé, d'où la nécessité impérieuse d'un choix correct de formes et de doses d'engrais assurant un bilan d'azote positif.

Les observations ont mis en relief deux maximums de taux de l'azote assimilable dans le sol, au début de la végétation et à la période de montée ou un peu plus tard.

La quantité d'azote échangeable dans le sol porte un caractère global et dépend des processus suivants: la dynamique de l'azote minéral et organique du sol; l'arrivée et la transformation de l'azote des engrais dans le sol; la consommation de l'azote par les plantes (le riz); l'absorption de l'azote par la microflore du sol; les migrations des composés azotés dans les couches sous-jacentes et les pertes d'azote à l'état gazeux.

Les sols fumés et non fumés à l'azote se reconnaissent facilement, tant par leur teneur globale en azote que par le rapport azote ammonium/azote nitrique. Un rôle important revient ici, non seulement à la dose des engrais apportés, mais aussi à leur forme. On a remarqué qu'avant la submersion le sol renfermait aussi bien de l'azote ammonium que de l'azote nitrique. Mais après l'inondation, surtout dans la seconde moitié de la période de végétation, les nitrates disparaissent du sol. La quantité globale d'azote minéral diminue nettement au moment de la moisson, pour céder place à une certaine augmentation au milieu de la période de végétation. C'est un tableau classique de toute rizière que l'on associe habituellement à des processus intenses d'ammonification de la matière organique qui anticipent sur la consommation d'azote par les plantes.

Le besoin physiologique du riz en telle ou telle forme d'azote se reconnaît d'après les phases de la végétation. Les jeunes plantes assimilent mieux la forme réduite de l'azote (ammonium). Dans la période de croissance, la forme ammonium de l'azote est utilisée plus productivement et participe plus activement au processus du métabolisme. Aux phases de croissance et de développement plus avancées, les plantes utilisent également la forme réduite et la forme oxydée (azote de l'ammonium et azote nitrique).

Partant des besoins physiologiques du riz en azote, on peut conclure que les deux formes de cet élément doivent être présentes dans le sol. Cependant, pour donner une appréciation des transformations de l'azote apporté dans le sol, il faut remarquer que, sur les rizières, on emploie de préférence les engrais ammoniacaux, car ils subissent de moins grandes pertes que les engrais contenant de l'azote nitrique.

Par conséquent, le caractère spécifique des processus pédologiques de la rizière submergée présente des exigences particulières au régime de l'alimentation azotée et de la fumure du riz. Les fortes pertes d'azote nécessitent une étude soigneuse des termes et des procédés optimaux de fumure azotée, assurant une diminution minime du taux de l'azote du sol.

Le *régime de l'alimentation phosphorée* du riz a aussi ses particularités dont il faut tenir compte pour la fumure de cette culture.

En humidité excessive, les composés du fer étant très mobiles, la mobilité du phosphore augmente considérablement aux dépens du groupe des phosphates fixés aux sesquioxydes. Ce phénomène est dû à un changement des conditions d'oxydo-réduction. On constate ici un lien étroit entre la teneur en phosphore et la valeur du potentiel redox (Eh) (tableau 75).

Il est à signaler avant tout une corrélation inverse entre le potentiel redox et la teneur en oxyde ferreux qui va de quelques dixièmes à 120-160 mg pour 100 g de sol, tandis que le potentiel redox s'abaisse à des valeurs caractérisant les conditions de l'anaérobiose. La dynamique des phosphates se laisse aussi suivre assez nettement. Si dans un sol aéré avec une valeur de Eh égale à 537 mv, la teneur en P_2O_5

Tableau 75

Lien entre le phosphore mobile et le régime oxydo-réducteur ainsi que la teneur en oxyde ferreux du sol submergé
(d'après N. Smirnova)

Eh, mv	FeO, mg/100 g (0,1 n·H_2SO_4 extrait)	P_2O_5, mg/100 g (0,2 n·HCl extrait)	pH salin
537	0,3	26,0	5,00
204	120,0	37,5	5,20
115	160,0	42,5	5,16

était de 26 mg pour 100 g, en submersion, quand Eh diminue jusqu'à 115 mv, la teneur en phosphates échangeables augmente jusqu'à 42 mg pour 100 g de sol.

Les conditions d'inondation favorisent une meilleure alimentation phosphorée du riz. Ce qui se traduit non seulement par une augmentation du phosphore échangeable dans les sols submergés, mais aussi par la quantité de phosphore assimilée par les plantes. Par exemple, à la phase du tallage sur un sol où le riz était revenu trois années de suite, les plantes cultivées en submersion utilisaient 1,7 à 3,6 fois plus de phosphore que les plantes cultivées en irrigation périodique et, au stade laiteux, 1,7 à 2,5 fois plus. Les plantes cultivées en submersion renfermaient plus de phosphore à toutes les phases de croissance et de développement pour toutes les doses d'engrais phosphatés apportées. Les différences étaient particulièrement nettes aux phases initiales de croissance et de développement des plantes. Ceci prouve une utilisation intense des engrais phosphatés, immédiatement après leur apport.

L'amélioration de l'alimentation phosphorée des plantes en culture submergée fait que, sur les rizières, l'efficacité des engrais phosphatés est beaucoup plus basse que celle des engrais azotés.

Le *régime de l'alimentation potassique* du riz est caractérisé par une exportation élevée de cet élément. Pour constituer une récolte de grain de 30 q/ha, le riz consomme en moyenne 75 kg de K_2O. Mais à la différence de l'azote et du phosphore, dans la plupart des régions rizicoles, cette quantité de potassium est assurée par les réserves naturelles du sol. C'est pourquoi les engrais potassiques ont moins d'importance que les engrais azotés et phosphatés. Lorsque la récolte augmente et qu'on emploie de fortes doses d'engrais azotés et phosphaté le rôle des engrais potassiques s'élève aussi.

La quantité de potassium assimilable est déterminée principalement par le taux de ses formes échangeables dans le sol. Cependant, le potassium fixé se trouvant dans le réseau cristallin des minéraux du sol peut jouer un rôle important pour l'alimentation du riz sur un champ inondé où sa mobilité augmente.

La teneur du sol en potassium mobile dépend pour beaucoup des propriétés génétiques du sol et de sa composition minérale. Aussi,

le besoin d'un apport complémentaire de potassium au riz est-il déterminé par les particularités zonales et le type des sols. Il est utile d'employer des engrais potassiques sur des sols boratés fortement podzoliques, occupés par le riz après plusieurs années de cultures sèches, ainsi que sur les sols tourbeux après 4 à 6 ans de riziculture.

Sur les sols à gley podzoliques et les podzols à gley un apport d'engrais potassiques sera efficace après leur utilisation pendant de longues années (6 à 10 ans) pour la culture du riz.

La mobilisation des éléments minéraux dans les sols submergés assure une certaine amélioration de l'alimentation du riz par le sol en comparaison d'autres cultures. Mais il est impossible d'obtenir de bonnes récoltes uniquement aux dépends des réserves de fertilité naturelle, même sur les sols les plus riches.

L'augmentation du rendement du riz est étroitement rattachée à l'emploi d'engrais, car cette culture est une de celles qui y répondent le mieux.

De nombreuses expériences en champ effectuées en U.R.S.S. ont montré qu'en apportant des doses optimales, chaque kilogramme de NPK dans le rapport 1 : 0,6 : 0,4 des éléments nutritifs donne un accroissement moyen de récolte d'environ 10 kg/ha de grain. Par conséquent, pour augmenter la récolte de grain de 10 q/ha il faut donner 100 kg de NPK (50 kg de N, 30 kg de P_2O_5 et 20 kg de K_2O). De cette façon si, au départ, le sol assure, aux dépens de ses réserves de fertilité, une récolte de 30 à 35 q/ha de grain, pour obtenir un rendement de 60 à 70 q/ha il faut lui apporter 120 à 180 kg de N, 80 à 200 kg de P_2O_5 et 50 à 70 kg de K_2O à l'hectare.

Les *engrais azotés* sont les plus efficaces. Ils augmentent considérablement la récolte de riz aussi bien quand on les utilise à part, qu'associés aux engrais phosphatés et potassiques.

Les engrais azotés élèvent le taux de la chlorophylle dans les feuilles, la productivité de la photosynthèse, favorisent une forte augmentation de la superficie des feuilles, la croissance de la masse sèche et, par conséquent, la récolte de riz.

La période à laquelle le riz consomme le plus d'azote sont les phases du tallage et de la montée quand les plantes absorbent environ 65 à 70 % de tout l'azote apporté. L'utilisation de l'azote par les plantes se poursuit jusqu'à la floraison, pour devenir ensuite insignifiante.

Avec des doses modérées d'engrais azotés la récolte augmente aux dépens de l'augmentation du tallage productif de la longueur et de la richesse en grain des panicules, du poids absolu du grain. Les recherches montrent qu'avec un apport de doses optimales d'engrais azotés le tallage productif du grain augmente de 5,5 à 6 fois.

La culture du riz présente de grandes exigences aux formes de l'alimentation azotée. Les engrais renfermant des nitrates sont toujours moins efficaces pour le riz que les formes ammoniacales ou amides.

La forme d'engrais azoté le plus communément employée est le *sulfate d'ammonium* renfermant l'azote ammonium. Ayant des propriétés physiques favorables, cet engrais est facilement utilisé tant en fumure de fond qu'en fumure d'appoint.

Parmi les engrais ammoniacaux on utilise en riziculture le *nitrate d'ammoniaque*. Bien que ce soit un engrais plus concentré, son efficacité est beaucoup moindre que celle du sulfate d'ammonium.

Avec de fortes normes d'irrigation et un bon lavage des sols on peut utiliser en riziculture le *chlorure d'ammonium*, qui, dans les conditions ordinaires, pourrait provoquer la salure du sol par les chlorures.

Actuellement, on utilise largement l'*urée*, engrais azoté hautement concentré renfermant l'azote sous la forme amide. L'avantage de cet engrais réside dans le fait qu'il ne contient pas de radicaux anioniques acidifiant le sol (comme le sulfate d'ammonium, par exemple), qu'il se distingue par un principe actif puissant, des propriétés physiques favorables et est donc principalement employé sous forme de granulés. Sur les rizières, l'urée ne le cède en rien, par l'efficacité, au sulfate d'ammonium. Etant donné sa grande mobilité et sa faculté de pénétrer dans la plante sous forme de molécule entière, elle est prometteuse en tant que fumure d'appoint par les feuilles.

L'*eau ammoniacale et l'ammoniac anhydre* sont également, pour le riz, une bonne source d'azote. Cependant, l'emploi de ces engrais azotés présente quelques difficultés. Pour éviter les pertes d'azote par volatilisation, ces engrais seront enfouis assez profondément dans le sol. L'ammoniac anhydre peut être utilisé aussi dissous dans l'eau d'irrigation, bien qu'alors une bonne partie de l'azote se volatilise.

Les recherches ont montré que l'efficacité des diverses formes d'engrais azotés employés en riziculture s'exprime par les chiffres suivants: sulfate d'ammonium — 100 %, chlorure d'ammonium — 97 %, cianamide — 92 %, urée — 90 %, eau ammoniacale — 85 %, ammoniac anhydre — 83 %.

Dans la pratique de la riziculture, on emploie largement les apports fractionnés d'engrais qui, non seulement créent de grandes réserves de substances nutritives avant les semis ou le repiquage, mais règlent l'alimentation des plantes pendant la végétation.

L'apport fractionné d'engrais azotés (une, deux ou trois fumures d'appoint) est justifié par la longue période de végétation du riz, par le caractère de l'absorption de l'azote qui présente plusieurs pics de consommation par les plantes et, enfin, par les singularités de la culture en submersion, ce qui détermine un régime particulier de l'azote dans le sol et ses fortes pertes improductives. La première fumure d'appoint est donnée à la phase de la levée, quand la plante a 3 ou 4 feuilles; la deuxième, à la phase du tallage et la troisième, à celle de l'épiaison.

Les particularités des processus oxydo-réducteurs qui se déroulent dans le sol des rizières ont pour conséquence qu'un rôle important revient ici au procédé d'emploi des engrais. Dans l'épandage en couverture, quand les engrais se répandent dans la couche superficielle acidifiée du sol, leur efficacité tombe fortement en raison des pertes d'azote.

A l'Institut international du Riz (IRRI) l'apport localisé (à 10 cm de profondeur) de l'urée avait augmenté la récolte de grain de riz de 15,8 q/ha en comparaison de l'épandage en couverture.

L'apport localisé au riz de sulfate d'ammonium est également plus efficace que l'épandage en couverture. En U.R.S.S., par exemple, l'apport de 60 kg/ha d'azote en couverture fournissait une récolte de riz Krasnodarski-424 de 54,9 q/ha ; l'épandage sur les lignes élevait la récolte jusqu'à 70,5 q/ha. Avec une plus forte dose d'azote, (120 kg/ha) en couverture, on obtenait une récolte de 61,0 q/ha ; la même dose apportée en lignes donnait 76,7 q/ha. Ainsi, l'efficacité d'une augmentation des doses d'engrais de 60 à 120 kg était la même pour les deux procédés d'épandage et se mesurait par un accroissement de rendement de 5,9-6,1 q/ha. Mais l'efficacité de chacune de ces doses augmentait en apport localisé. On voyait également s'élever le coefficient d'utilisation de l'azote apporté et la teneur du grain en protéine montait de 4,56 à 5,0 %.

Fait caractéristique, quand on apportait les engrais azotés à une profondeur de 10 à 15 cm, leur coefficient d'utilisation s'élevait considérablement. Ainsi, selon certains chercheurs, l'assimilation de l'azote du sulfate d'ammonium par les plantes était de 21 % avec un apport en couverture, de 34 % pour l'urée, tandis que pour un apport local à une profondeur de 10 cm, l'assimilation était respectivement de 65 et 71 %.

Les **engrais phosphatés** occupent la seconde place après les engrais azotés par leur efficacité en riziculture.

Le riz a le plus besoin de phosphore aux phases initiales de sa croissance et de son développement ; dans la suite, ce besoin peut être satisfait par réutilisation. Cette particularité physiologique justifie les fumures d'appoint précoces du riz par engrais phosphatés, afin d'assurer aux jeunes plantes une assez grande quantité d'élément nutritif assimilable. Des recherches effectuées sur des sols châtains ont montré que le phosphore n'est assimilé par le riz qu'aux phases de la levée et du tallage. A des phases plus tardives, ce sont les engrais azotés qui favorisent l'accès du phosphore dans les plantes ; sous leur influence, la concentration de P_2O_5 dans la masse aérienne du riz augmente aux phases de la montée et au stade laiteux. C'est ce phénomène, c'est-à-dire une plus forte assimilation du phosphore sous l'influence de l'azote, qui est considéré comme une des causes du peu d'efficacité des engrais phosphatés en riziculture.

En même temps, plus que les autres plantes, le riz est sensible à un excès de phosphore et y réagit par une baisse de récolte. En l'excès de phosphore minéral, le fer bivalent se trouve fixé dans la plan-

te. Ceci provoque des troubles physiologiques de l'organisme végétal, en particulier, la chlorose. La proportion des substances nutritives dans le sol doit donc être décalée vers une forte prédominance de l'azote et du potassium sur le phosphore. On estime que, pour une alimentation normale des plantes, le phosphore doit être en quantité 5 à 10 fois inférieure à celle de l'azote et du potassium.

Le besoin qu'a le riz d'un apport complémentaire de phosphore dépend de la façon dont les sols sont pourvus en phosphates mobiles. Plusieurs recherches ont montré que sur les sols de prairie marécageux et les sols de prairie encroûtés par la sécheresse (takyrs) l'emploi des engrais phosphatés aux doses de 30 kg/ha de P_2O_5 n'est pas rationnel et que les récoltes croissent seulement sur un sol de prairie désertique quand les doses augmentent jusqu'à 120 kg de P_2O_5 à l'hectare. Sur la base de ces recherches on a proposé l'échelle suivante d'approvisionnement des sols en phosphates mobiles:

P_2O_5, mg/kg	Approvisionnement du sol en phosphate	Doses recommandées d'engrais phosphatés
0-30	bas	60-90
30-60	moyen	30
60	élevé	0-30

Néanmoins, il faut remarquer que cette échelle ne peut être recommandée pour toutes les régions rizicoles, car, souvent, surtout quand on apporte des doses élevées d'azote, on observe un accroissement notable de récolte en épandant de plus fortes doses d'engrais phosphatés.

Comme nous l'avons déjà noté, le riz exige davantage de phosphore dans le sol à sa période initiale de croissance. Il faut donc donner des engrais phosphatés en culture d'appoint. Pourtant les recherches montrent que, souvent, des fumures d'appoint de phosphore ne sont pas justifiées.

En ce qui concerne la réaction à la forme des engrais, le riz est moins exigeant envers le phosphore qu'envers l'azote. Il est possible que ceci se rattache au fait qu'en pratique les engrais phosphatés ne sont donnés que sous la forme de superphosphate simple, granulé ou double. Signalons que le riz inondé peut également utiliser les phosphates peu solubles de sources telles que le précipité ou la farine de phosphorites.

En U.R.S.S., par exemple, en testant les diverses formes d'engrais phosphatés on a obtenu les récoltes de riz suivantes: avec du superphosphate simple — 54 q/ha; du superphosphate défluoré — 51 q/ha; du superphosphate d'apatite — 50 q/ha; des scories: 49 q/ha; de la farine de phosphorites: 43 q/ha; du précipité: 50 q/ha.

Les engrais potassiques sont moins efficaces en riziculture que les engrais azotés et phosphatés. Ceci s'explique, sans doute, par le fait que le besoin du riz en potassium est satisfait, dans la plupart

des cas, par le potassium du sol et que le riz ne réclame pas autant de cet élément que d'azote.

La masse aérienne du riz renferme de 2,0 à 4,0 % de potassium; les racines, de 0,5 à 3,0 %. Dans la plante, il se trouve sous forme d'ions et ne constitue pas un composé complexe avec la matière organique.

Le rôle physiologique du potassium consiste en ce qu'il favorise la circulation des glucides dans la plante et participe au processus de la respiration. Un approvisionnement renforcé des plantes en potassium, quand le grain grossit, favorise donc l'accumulation de réserves de glucides. Quand le taux du potassium dans les feuilles et les tiges tombe à 1,0-1,5 %, la croissance des plantes est entravée et si les organes aériens du riz contiennent moins de 1 %, le tallage cesse.

Une alimentation optimale du riz en potassium est particulièrement importante à la période de la formation de ses organes reproducteurs. Quand les feuilles renferment moins de 1,2 % de potassium, la formation des panicules est perturbée, le nombre des épillets diminue, les panicules renferment moins de grains et la masse de 1000 grains de riz baisse. De plus, le potassium assimilé au moment où le grain gonflait agit mieux sur la formation des panicules que le potassium déjà contenu dans la plante. Ceci suggère qu'il est rationnel d'apporter tard une fumure d'appoint de potassium ce qui, dans certains pays, est actuellement mis en pratique. Dans les essais en champ, des fumures d'appoint fractionnées tardives donnent des accroissements de récolte du riz de 3 à 4 q/ha. L'efficacité des engrais potassiques augmente particulièrement quand on utilise de fortes doses d'azote.

Les oligo-éléments apportés dans le sol ou aux semences par un traitement avant le semis procurent un gain appréciable de récolte de grain de riz. Le rôle des différents oligo-éléments dans l'accroissement de la récolte et l'amélioration du grain croît fortement à mesure qu'augmentent le rendement de la culture, la quantité des éléments nutritifs prélevés sur le sol et les normes d'engrais minéraux apportés.

Bien que dans les rizières le sol renferme assez de manganèse mobile, étant donné que les plantes ont un grand besoin de cet élément, on constate, dans certains cas, une action positive des engrais manganésiens. Dans les régions pauvres en bore, des engrais boratés donnent de bons gains de récolte de riz.

L'emploi des oligo-éléments est plus efficace sur les sols où la culture du riz est pratiquée durant de longues années. Dans ce cas on obtient des accroissements de récolte de 6 à 7 q/ha et plus. En U.R.S.S., par exemple, sur chernozems de prairie on a constaté une grande efficacité des oligo-éléments en riziculture. Ainsi, le traitement avant semis des semences au molybdate d'ammonium à 0,1 % donnait un gain de récolte de 10,4 q/ha; le traitement au sulfate de cuivre à 0,5 %, un gain de 9,3 q/ha; au sulfate de manganèse à 0,05 %, un gain de 5,1 q/h; à l'acide borique à 0,03 %, 1,3 q/ha.

L'efficacité des différents oligo-éléments dépend de leur taux dans le sol.

En riziculture, les procédés d'apport des oligo-éléments sont déterminés par les doses et les formes de ces engrais. Avec des doses de quelques kilogrammes, on peut les apporter au sol mélangés aux engrais minéraux ; pour des normes plus basses, on utilise ordinairement un traitement avant semis des semences en humectant ou pulvérisant au moyen de solutions d'oligo-éléments.

Les engrais organiques donnent également un accroissement notable de la récolte de riz, car cette culture exige un sol fertile. En Afrique occidentale, en plus du fumier, on se sert de composts comme engrais organique, on enfouit aussi la masse verte des légumineuses ou bien encore la paille de riz. Les légumineuses semées après la moisson de riz ou d'autres cultures précédentes donnent non seulement de bonnes récoltes de masse verte, mais aussi de grain. Le dolic (*Vigna*) semé en novembre donne un grain mûr (25 q/ha) en mars, au début de la préparation des champs pour la culture du riz. L'enfouissement de la masse verte de la crotalaria quelques jours avant les semis de riz permet d'augmenter la récolte de grain de 40 à 45 %. Outre la crotalaria et le dolic on sème, pour la sidération, les légumineuses. Sous les tropiques, la paille de riz est rarement enfouie comme engrais, on la brûle. L'enfouissement de paille de riz, surtout combiné à des engrais minéraux (NPK), peut avoir de bons résultats. Quand on enfouit la paille de riz en zone tropicale il faut apporter non moins de 6-12 et jusqu'à 25 kg d'azote à l'hectare. Enfouir sur les rizières la paille et d'autres engrais organiques sans donner d'azote minéral, revient à favoriser l'immobilisation de l'azote du sol et abaisser ainsi sa consommation par le riz.

Sous les tropiques, la sidération des rizières, surtout sur les terres basses où le sol est mal aéré, conduit à l'accumulation dans le sol d'acides organiques jusqu'à des concentrations toxiques. Cependant, dans ces conditions l'accumulation de ces acides peut être freinée par l'apport au sol d'azote minéral, de préférence sous la forme ammonium.

Actuellement, en Afrique occidentale, sur les sols insuffisamment pourvus en phosphore et potassium on apporte au moment du principal travail de la terre et sous labour des engrais phosphatés et potassiques, ainsi qu'une petite partie des engrais azotés. La majeure partie de la dose d'engrais azotés est utilisée comme fumures d'appoint au cours de la végétation. La dose optimale d'azote quand on apporte des engrais phosphatés est, dans la zone tropicale d'Afrique occidentale, de 50 à 100 kg à l'hectare. Au Sénégal, en Côte d'Ivoire et dans d'autres pays on apporte, comme fumure de fond, 30, 60 et 45 kg/ha de N, P_2O_5 et K_2O respectivement ; comme fumures d'appoint, 60 à 80 kg/ha de N. Ceci permet d'obtenir environ 40 q/ha de grain de riz. Au Ghana on donne en moyenne au riz 22,4 kg de N, P_2O_5 et K_2O à l'hectare. Ces doses étant assimilées, la récolte de riz augmente ici de plus de deux fois, soit de 13,8 à 30,9 q/ha.

Le mil africain

Le mil africain (pénicillaire ou petit mil) est une céréale répandue dans les régions sèches de l'Afrique. Dans de nombreux pays africains, en tant que culture vivrière il a beaucoup plus d'importance que le sorgho. En République du Niger, par exemple, la surface ensemencée en petit mil est de 1,6 millions d'hectares, la production annuelle de grain, environ 650 000 tonnes ; pour le sorgho, les chiffres sont respectivement de 450 000 hectares et de 250 000 tonnes. Au Mali, 500 000 hectares sont occupés par le petit mil et 432 000 hectares sous le sorgho.

Le mil africain est supérieur au sorgho par sa résistance à la sécheresse. C'est pourquoi il est cultivé dans les régions plus arides. Il en résulte que, d'ordinaire, le mil le cède au sorgho. Au Tchad, la récolte moyenne du sorgho est de 7-8 q/ha ; celle du mil, de 4-5 q/ha. Dans la République du Niger, la récolte moyenne du sorgho est égale environ à 6 q/ha avec des fluctuations de 2 à 20 q/ha ; celle du mil, de 4 q/ha environ avec des fluctuations de 1,5 à 9 q/ha.

Une récolte de mil africain de 10 q de grain exporte en moyenne, d'après l'Institut de recherche en agriculture tropicale de la République du Sénégal, 40 kg de N ; 18,5 kg de P_2O_5 ; 21 kg de K_2O ; 25 kg de CaO ; 37 kg de MgO et 15 kg de SO_4. On notera la grande consommation de magnésium par le mil africain en regard d'une consommation assez modérée de potassium et de calcium. Si l'on ne moissonne que les panicules tout en enfouissant les tiges et les feuilles, l'exportation pour la même récolte sera, en fait, de 19 kg de N, 10 kg de P_2O_5, 11 kg de K_2O, 3 kg de CaO, 5 kg de MgO et 4 kg de SO_4.

Le rythme d'assimilation de l'azote par les plantes anticipe sur leur rythme de croissance jusqu'à la phase de l'épiaison. Le rythme d'assimilation du phosphore anticipe sur le rythme de croissance jusqu'à la floraison et la marche de l'assimilation du soufre correspond à peu près à celle de l'accroissement de la masse de matière sèche. Le potassium est absorbé énergiquement par le mil africain jusqu'à la fin de la montée. Cette substance nutritive est également consommée par les plantes aux phases plus avancées de croissance et de développement, mais moins énergiquement. Ce que nous venons de dire peut se rapporter aussi aux autres cations, l'absorption de calcium et de magnésium diminuant fortement à la période de l'épiaison. Cependant, on a constaté une plus grande consommation de ces éléments, surtout du magnésium, en fin de végétation.

Le mil africain répond bien à l'apport d'engrais minéraux. Au Sénégal, avec une agrotechnique plus ou moins satisfaisante, les engrais azotés accroissent fortement la récolte de grain, les engrais phosphatés le font moins. L'apport d'engrais potassiques est peu efficace. Il est plus rentable ici d'apporter les engrais azotés à la dose de 45 kg d'azote à l'hectare.

Le mil africain réagit différemment à l'apport de diverses formes

d'engrais azotés. Par exemple, au Sénégal, on a constaté un grand avantage du sulfate d'ammonium sur le nitrate d'ammoniac. Ceci dépend, sans doute, de la présence de soufre dans le sulfate d'ammonium. Cette hypothèse se voit confirmée par le fait que, sur un arrière-fond d'urée, l'apport de soufre donne un accroissement de récolte de 1,5 q/ha. Sur un arrière-fond de fumier, le sulfate d'ammonium a une action plus faible.

De meilleurs résultats sont obtenus si, outre l'enfouissement au cours de la préparation du sol, une partie des engrais azotés minéraux (20 à 30 kg/ha d'azote) est apportée avant le semis ; l'autre partie, à la phase du tallage. Si les engrais ne sont utilisés que sous la forme de fumures d'appoint, il est plus avantageux de les apporter par fractions égales au début du tallage (10 à 12 jours après la levée) et immédiatement avant l'épiaison.

Les expériences à Bambey (Sénégal) ont montré l'influence bénéfique de l'engrais vert sur la récolte de grain du mil africain. Cependant, l'apport conjoint d'engrais organiques et minéraux donne de meilleurs résultats.

Dans la République du Niger, les gains de récolte de grain de mil africain étaient de 1 à 1,5 q/ha après un apport de 1 q/ha d'engrais de composition 14:7:7. Cette norme est évidemment trop faible et quand on apporte de plus fortes quantités (de l'ordre de 45 à 60 kg/ha d'azote et d'autres substances nutritives) on obtient évidemment des accroissements de récolte plus importants. Au Niger, on pratique l'apport de fumier et de poudrette sous le mil africain.

L'éleusine corocana

L'éleusine corocana (corocan) est une culture céréalière importante dans certaines régions africaines. Le grain du corocan sert à faire de la farine, des gruaux, une bière locale. Il a également une certaine valeur comme fourrage et comme plante de pâturage.

Le grain du corocan renferme 8 à 13 % de protéine, 3 à 3,5 % de lipides secs, 3 à 4 % de cellulose brute, 2,5 à 3,5 % de cendres et 74 à 77 % de substances extractives non azotées.

En climat tropical, le corocan se développe comme une herbe vivace donnant de nouvelles tiges à mesure que les grains mûrissent sur les vieilles tiges. Cependant, en culture, l'Eleusine corocana est le plus souvent une graminée annuelle se multipliant par ensemencement. La durée de la période du semis à la récolte de graines de corocan varie, suivant la variété et les conditions écologiques, de 100 à 145 jours.

Le corocan n'est pas très exigeant envers la fertilité du sol. Pour une récolte de 7,5 t/ha de masse aérienne sèche, il absorbe 51 kg de N, 58 kg de P_2O_5, 54 kg de K_2O et 51 kg de CaO. Néanmoins, l'apport d'engrais, surtout azotés, accroît fortement la récolte d'éleusine. Ainsi, dans les expériences effectuées au Soudan, le gain de récolte par apport de 80 kg d'azote à l'hectare sous forme de sulfate d'am-

monium était de 6,2 q/ha. Dans ces expériences, l'efficacité du sulfate d'ammonium était de beaucoup supérieure à celle du nitrate de sodium. Ceci s'explique, sans doute, par la présence de soufre dans le sulfate d'ammonium.

Le sorgho

75 % environ de la production mondiale du sorgho sont utilisés pour l'alimentation humaine, principalement en Asie et en Afrique. Dans le nord du Nigeria, par exemple, le sorgho est la principale culture vivrière. Il y occupe un tiers environ de toutes les surfaces ensemencées. Dans toutes les régions de l'Afrique à climat soudanien le sorgho est une culture vivrière largement répandue.

Pourtant, en Afrique, les récoltes de grain de sorgho ne sont pas élevées et ne dépassent généralement pas 6 à 8 q/ha. Ceci s'explique surtout par le bas rendement potentiel des variétés qui y sont cultivées.

Les données de Tucker et Bennet, représentées au tableau 76, permettent de juger des besoins du sorgho en éléments nutritifs.

Quand il y a suffisamment d'eau, le sorgho répond bien à l'apport d'engrais, aussi bien minéraux qu'organiques. Ainsi, dans les expériences de l'Institut de recherche en agriculture tropicale à Bambey (Sénégal) le plus grand accroissement de récolte (de 20 à 25 %) était assuré par l'apport de 150 kg/ha d'engrais de composition 14-7-7 qui dépassait par son effet l'apport de 10 t/ha de fumier. C'est surtout à une fumure azotée que le sorgho était sensible. Une dose même faible d'azote (10 kg/ha) apportée au semis faisait fortement augmenter la récolte de grain. Cependant une fumure d'appoint azotée apportée tard (au moment de l'épiaison) restait inopérante.

Tableau 76

Exportation des éléments nutritifs avec la récolte de grain et de paille du sorgho

Récolte, kg/ha	Exportation d'éléments nutritifs (kg/ha)					
	avec la récolte de grain			avec la récolte de paille		
	P_2O_5	N	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
3360	60	17	13	34	12	67
4480	81	22	18	44	16	90
5600	95	28	22	56	19	112
6720	114	34	27	67	24	134
7840	125	39	31	78	27	157
8960	134	44	36	90	31	179

En République de Haute-Volta, l'apport de petites quantités de mélanges d'engrais minéraux (60 % de précipité et 40 % de sulfate d'ammonium, 150 kg/ha en tout) accroissait la récolte de grain de sorgho de 6,3 à 10 q/ha, le posteffet des engrais se manifestant aussi l'année suivante.

Les expériences de Goldsworthy sur les engrais dans différentes régions d'Afrique ont montré une forte augmentation de la récolte de sorgho sous l'influence du sulfate d'ammonium et du superphosphate simple. Dans une de ces expériences, l'apport de 26,3 kg de N et de 16,2 kg de P_2O_5 faisait augmenter la récolte de grain de 358 kg/ha. Dans un autre cas, l'apport de 26,3 kg de N et de 21,2 kg de P_2O_5 donnait un gain de récolte de grain de 594 kg/ha. Dans certaines régions, l'apport d'engrais ne provoquait qu'une légère augmentation de la récolte et restait économiquement peu efficace. Dans la culture de variétés locales il était économique de n'apporter que de faibles doses d'engrais, par exemple, 7,5 tonnes de fumier d'étable avec 125 kg de superphosphate simple et 125 kg de sulfate d'ammonium par hectare.

Dans les expériences effectuées au centre de recherche agricole de Bambey, l'emploi de 600 kg/ha d'engrais minéraux de composition 10-13, 3-10 associé à un travail du sol plus profond et plus intense faisait augmenter la récolte de grain de 555 kg/ha à 1746 kg/ha et s'avérait hautement productif.

Les sols du Bénin sur lesquels est cultivé le sorgho se caractérisent dans l'ensemble par une faible teneur en matière organique, ils sont pauvres en azote, en phosphore et souvent en soufre. On conseille donc d'apporter ici au sorgho 150 kg/ha de sulfate d'ammonium et 70 kg/ha de superphosphate double.

Il reste encore à résoudre le problème de la fumure du sorgho dans les assolements. Une expérience effectuée au Bénin a mis en évidence que les meilleurs prédécesseurs du sorgho étaient l'igname, l'arachide, le cotonnier et les légumineuses sur engrais vert. D'autres essais spéciaux ont également été entrepris pour étudier l'efficacité de l'assolement sorgho-arachide. Dans l'ensemble, il est économique d'employer des engrais dans l'assolement arachide-sorgho. A la station expérimentale d'Ina (Bénin) l'apport de 30 kg/ha de sulfate d'ammonium et de 100 kg/ha de phosphate bicalcique à l'arachide assurait une certaine augmentation de récolte de grain de sorgho et s'est montré économiquement très efficace. Le même effet a été obtenu à Boukombé avec 60 kg/ha de sulfate d'ammonium et 100 kg/ha de phosphate bicalcique.

Dans beaucoup de pays d'Afrique occidentale, les récoltes de sorgho s'accroissent souvent sous l'influence de l'arrière-action des engrais apportés à la culture précédente, le cotonnier (tableau 77).

Au Mali, dans la rotation de cultures jachère-cotonnier-sorgho-arachide les meilleurs résultats ont été donnés par l'apport de fumier immédiatement sous le sorgho à la norme de 20 t/ha. Dans ce cas, la récolte de grain était de 26 q/ha (accroissement de 10 q/ha). La fumure

Tableau 77

Influence des engrais apportés à la culture précédente sur la récolte de grain du sorgho

Pays	Récolte de grain, kg/ha	
	après un prédécesseur non fumé	après un prédécesseur fumé
Mali	565	1412
Haute-Volta	581	1288
Togo	603	937
Bénin	1070	1432

d'un champ après jachère ne donnait une récolte de grain de sorgho que de 4,3 q/ha ; la fumure après le cotonnier ayant précédé le sorgho donnait une récolte de 7,2 q/ha. Quand la norme de fumier était diminuée de moitié (à 10 t/ha), l'accroissement de récolte diminuait aussi presque de moitié, ce qui montre combien le sorgho est sensible à l'apport de fumier. Des résultats analogues ont été obtenus dans d'autres pays.

Le maïs

Le maïs est souvent regardé comme l'indicateur de la façon dont le sol est pourvu en éléments fertilisants. Ceci s'explique par son grand besoin de ces éléments et par sa mauvaise croissance quand le sol en est pauvre. Les données de Mudra sur l'exportation, présentées au tableau 78, donnent une idée nette du besoin du maïs de matières nutritives.

Tableau 78

Exportation des éléments nutritifs par le maïs

Partie de la plante	Récolte, q/ha	Eléments nutritifs, kg/ha			
		N	P_2O_5	K_2O	CaO
Grain	25	40	14	9	0,7
Paille	50	37	15	82	24,0
Total	—	77	29	91	24,7
Grain	40	64	23	15	1,2
Paille	70	52	21	115	34,0
Total	—	116	44	130	35,2

Le maïs consomme les substances nutritives pendant presque toute la durée de sa végétation, jusqu'au stade pâteux. Cependant, leur absorption est surtout intense dans la période de croissance rapide (épiaison et floraison) pendant un laps de temps relativement court (tableau 79).

Tableau 79

Dynamique de l'accumulation de la matière organique et consommation des principaux éléments nutritifs par le maïs (en % du maximum)

Phase de croissance et de développement	Matière sèche	N	P_2O_5	K_2O
4-5 feuilles	0,1	0,3	0,2	0,2
9-10 feuilles	1,2	4,2	2,5	4,4
Apparition des panicules	24	44	33	69
Floraison	35	61	61	79
Stade laiteux	80	89	88	95
Stade pâteux	100	100	94	100
Maturité complète	94	93	100	82

Le maïs est principalement cultivé pour le grain et l'ensilage; dans certaines régions, comme maïs fourrager.

La fumure azotée exerce une bonne influence sur la croissance végétative et la récolte de maïs. La fumure phosphorée agit favorablement sur le développement des organes reproducteurs des plantes, accélère la formation et la maturation du grain et favorise la croissance et le développement des racines. La forte croissance de la masse végétative du maïs exige une fumure potassique suffisante. La pénurie de potassium dans l'alimentation entraîne l'accumulation de substances protéiques dans les nœuds de la tige, ce qui entrave la circulation des éléments assimilés et ralentit ainsi la croissance de la plante entière. Par conséquent, dans la culture du maïs on ne saurait renoncer à l'usage d'engrais. Le maïs ne donne de bonnes récoltes que si les plantes sont suffisamment pourvues d'éléments nutritifs.

Le maïs répond bien à l'apport de fumier et d'autres engrais organiques. On sait que l'apport de doses moyennes de fumier peut accroître la récolte de grain de maïs de 3 à 10 q/ha. Quand la norme de fumier apporté est augmentée la récolte s'accroît, surtout sur les sols peu fertiles. L'association de fumier et d'engrais minéraux assure de bonnes récoltes avec de moindres doses de fumier.

Les engrais organiques (fumier, composts) et une grande partie des engrais minéraux sont épandus sous labour avant le semis.

Quand on sème le maïs sur des terres de culture ou en l'absence d'engrais organiques, ce qui n'est pas rare sous les tropiques, on peut se borner à n'apporter que des engrais minéraux. Dans ce cas, pour satisfaire les besoins du maïs en éléments nutritifs Jacob et Uexküll conseillent les doses moyennes suivantes: 45 à 90 kg de N, 50 à 100 kg de P_2O_5 et 67 à 100 kg de K_2O.

Sur les chernozems carbonateux ou ordinaires, on obtient des gains élevés de récolte de grain par des engrais phosphatés. Sur les chernozems lessivés et, surtout, sur les sols gris forestiers l'apport d'azote est efficace (tableau 80).

Les données de nombreux centres de recherche montrent que sur les chernozems carbonateux et ordinaires, les engrais potassiques

Tableau 80

Influence des engrais phosphatés et azotés sur la récolte de maïs

Sols	Récolte sans engrais, q/ha	Gain de récolte, q/ha		Nombre d'expériences
		P_{40}	$P_{40}N_{45}$	
Chernozems carbonateux et ordinaires	43,0	4,6	6,2	66
Chernozems lessivés	46,4	4,6	7,7	4
Sols gris forestiers	47,0	1,7	10,7	4

restent inopérants. Sur un arrière-fond d'engrais phosphatés et azotés, l'apport de potassium accroît la récolte sur les chernozems lessivés et les sols gris forestiers.

Sur les podzols engazonnés une fumure minérale en dose complète améliore la récolte de maïs, surtout si elle est apportée sur bandes avant le semis.

Comme nous l'avons déjà noté, le premier mois après le semis, le maïs absorbe peu de substances nutritives. Cependant, à cette époque, une pénurie d'éléments nutritifs, surtout de phosphore, peut faire baisser par la suite la croissance des plantes et la formation des épis. C'est 10 à 15 jours après l'apparition des jeunes pousses que survient un moment critique dans l'alimentation phosphorée du maïs, c'est pourquoi l'apport d'engrais phosphatés au semis renforce la croissance des plantes et fournit un gain de récolte appréciable. Sur les chernozems, la moyenne d'accroissement de récolte de grain de 56 expériences par l'apport de 7,5 kg de P_2O_5 de superphosphate répandus au poquet représentait 3,5 q/ha pour une récolte de 32,7 q/ha sans fumure.

Les jeunes pousses de maïs sont sensibles à une haute concentration de la solution du sol, on ne donnera donc dans les poquets que de petites doses d'engrais. De fortes doses de superphosphate font baisser les gains de récolte. Par exemple, l'apport de superphosphate au poquet à raison de 5 kg, 10 kg et 20 kg de P_2O_5 par hectare donnait respectivement un gain de récolte de grain de 3,4 q, 1,7 q et 0,5 q à l'hectare. Les engrais azotés et potassiques épandu à fortes doses au semis nuisaient au maïs. Quand on enfouit les engrais minéraux dans le poquet il faut donc les séparer des semences par une couche de terre. L'apport des engrais au sol à proximité du poquet est efficace (tableau 81).

C'est le superphosphate qui convient le mieux pour l'apport en poquets. Sa dose optimale est de 5 à 7 kg de P_2O_5 à l'hectare. Sur les chernozems fortement lessivés et les podzols engazonnés, l'azote, à la dose de 2 à 2,5 kg/ha, joue un rôle positif dans la fumure de base.

Afin de pourvoir le maïs en éléments nutritifs dans sa période de croissance la plus intense, les fumures d'appoint sont nécessaires. Aussi, donne-t-on une ou deux fumures d'appoint dans la période

Tableau 81

Influence des procédés d'apport des engrais au semis sur la récolte de maïs

Dose d'engrais à l'hectare	Gain de la récolte de grain (q/ha) par l'apport d'engrais	
	au poquet	à proximité du poquet
10 kg de P_2O_5	4,1	8,9
10 kg de P_2O_5 + 5 kg de N	—5,3	10,2
10 kg de P_2O_5 + 5 kg de N + 5 kg de K_2O	—7,3	9,9

de végétation. Une fumure d'appoint précoce avant le premier binage des interlignes est la plus efficace. On apporte à l'hectare, au cours de la première fumure d'appoint, 0,6-1 q de nitrate d'ammonium et 1-1,5 q de superphosphate.

La seconde fumure d'appoint sera apportée avant l'apparition des panicules. A ce moment, on épand par hectare 1 q de superphosphate et 0,5 q de chlorure de potassium. Sur les semis plus faibles, on apporte, à la deuxième fumure d'appoint, en plus des engrais phosphatés et potassiques, des engrais azotés. A la fumure d'appoint, les engrais sont enfouis à la profondeur de 8 à 10 cm dans la couche humide du sol.

Le blé

Le blé est la plus importante des cultures vivrières. Le grain de blé renferme beaucoup de protéine (12 à 14 % en moyenne) et possède de bonnes qualités meunières et boulangères.

Le blé ne supporte pas un sol acide, il répond très bien au chaulage et à la fumure.

Pour un rendement du grain de 25 q/ha et de paille de 50 q/ha, l'exportation d'éléments nutritifs est, selon Schmalfus, de 70 kg de N, 30 kg de P_2O_5, 60 kg de K_2O et 30 kg de CaO. Ceci correspond à l'exportation, pour chaque quintal de grain, de 2,8 kg de N ; 1,2 kg de P_2O_5 ; 2,4 kg de K_2O et 1,2 kg de CaO. Kopetz mentionne à peu près la même exportation d'éléments nutritifs pour chaque quintal de grain : 3 kg de N, 1,4-1,6 kg de P_2O_5, 2,5-3,0 kg de K_2O.

Pour l'essentiel, l'absorption de l'azote et des éléments minéraux s'achève, pour le blé, au moment de l'épiaison-floraison (tableau 82). Par conséquent, le blé consomme intensément les éléments de l'alimentation minérale.

L'alimentation du blé en phosphore et potassium est assurée pour le mieux en enfouissant profondément les engrais phosphatés et potassiques au labour, tout en leur ajoutant de petites doses de superphosphate sur les lignes.

Tableau 82

Consommation des principaux éléments par le blé (en % du maximum)

Phase de croissance et de développement de la plante	N	P_2O_5	K_2O
Epiaison	71	68	88
Floraison	97	100	100
Maturité complète	90	93	67

Au début de sa croissance, le blé est très sensible à l'insuffisance de phosphore, c'est pourquoi, quand on apporte une petite dose de superphosphate (0,5 q/ha) sur les lignes, le rendement augmente de 2-2,5 q/ha. Les engrais azotés sont apportés lors du travail de préparation du sol au semis. En Afrique occidentale, l'azote joue le rôle décisif pour l'augmentation des récoltes de blé.

De l'épiaison à la maturité, le blé consomme encore environ 30 à 40 % de la quantité d'azote nécessaire. On devra donc donner la dose totale d'engrais azotés en plusieurs reprises. Les meilleurs moments pour épandre l'azote sont la phase du tallage, le début de la montée, le début de la floraison.

L'apport d'engrais azoté au moment du tallage fait augmenter la densité des plantes et exerce une influence favorable sur le besoin ultérieur d'azote des plantes. L'emploi de l'azote au début de la montée fait augmenter en premier lieu le nombre de grains dans l'épi. La fumure azotée au début de la floraison améliore la formation du grain, sa force boulangère et la qualité des semences.

L'apport fractionné de l'azote en trois fois ne sera rationnel que si ses doses sont élevées (80 à 120 kg/ha de N) et si les précipitations atmosphériques sont suffisamment abondantes. Etant donné la forte densité des plantes, on apportera l'engrais à la main au début de la phase de la floraison ou avec l'eau d'irrigation.

Pour des raisons techniques, le plus souvent toute la dose d'azote n'est apportée, cependant, qu'en deux reprises, la première dose étant donnée avant le semis en même temps que les engrais phosphatés et potassiques ou dès la levée. La deuxième dose, avant le début de la montée.

Notons qu'un apport unilatéral d'engrais azoté peut nuire au blé. D'après Arakeri et d'autres, par exemple, un apport exclusif d'engrais azoté à la dose de 22,4 kg/ha de N faisait baisser de 14 % la résistance du blé à la verse. Au contraire, un apport d'engrais phosphaté et potassique à la dose de 22,4 kg de P_2O_5 et de 22,4 kg de K_2O à l'hectare élevait respectivement cet indice de 23 et 40 %.

Lorsque ces engrais sont apportés séparément, on obtient de chaque kilogramme d'azote 3,6 kg de gain de la récolte de grain et 3,1 kg pour chaque kilogramme de P_2O_5. Lorsque les engrais azotés et phosphatés étaient donnés ensemble, cet indice était de 12,6 kg

d'accroissement de la récolte de grain pour chaque kilogramme d'élément actif apporté. De plus, il est nécessaire d'apporter une quantité adéquate d'engrais phosphaté et potassique, en même temps que de l'engrais azoté, afin d'augmenter la résistance du blé à la sécheresse et aux maladies.

Les proportions d'éléments nutritifs convenant le mieux au blé dans la fumure (N:P:K) varient entre les limites 1 :2 :1 et 2 :3 :3.

Sous les tropiques, les doses d'engrais apportés au blé sont souvent un peu plus élevées. Ceci s'explique par le fait que, dans la zone tropicale, en comparaison des régions tempérées, le blé absorbe en moins de temps la quantité d'éléments nutritifs dont il a besoin. Dans les régions arides, c'est l'engrais phosphaté qui a beaucoup d'importance ; dans les régions plus humides, ce rôle revient à l'engrais potassique.

Les doses moyennes d'engrais minéraux pour le blé varient, suivant les conditions locales de sa culture, dans les limites suivantes : 34 à 56 kg de N, 50 à 67 kg de P_2O_5, 50 à 67 kg de K_2O à l'hectare.

Ces dernières années, pour éviter la verse du blé provoquée par l'apport de fortes doses d'engrais azotés, les semis subissent un traitement de CCC (chlore-choline-chlorure) à raison de 2 à 5 kg d'élément actif à l'hectare.

Dans les régions arides, il faut enfouir plus profondément les engrais dans le sol afin qu'ils aient davantage d'eau pour se dissoudre.

L'apport des engrais en lignes donne de bons résultats. Avec la moitié de la dose nécessaire on peut obtenir dans ce cas les mêmes accroissements de récolte qu'en apportant la dose entière en couverture avant le semis.

En culture irriguée ou dans les régions à pluviométrie élevée il est particulièrement efficace d'apporter ensemble les engrais minéraux et les engrais organiques. Dans ce but, on utilise souvent, par exemple, le fumier d'étable, un compost bien préparé, des tourteaux d'arachide ou la sidération. Pour l'engrais vert on cultive ordinairement *Vigna sinensis*, *Crotalaria juncea*, *Brassica napus*, *Phaseolus acutifolius*, *Phaseolus aurens*, *Cyamopsis tetragonoloba*, *Sesbania cannabia*.

RACINES ALIMENTAIRES À FÉCULE

Le manioc

Le manioc a un fort rendement et une teneur élevée de ses racines en glucides. Il exige donc des sols bien pourvus en éléments nutritifs. Sous les tropiques, il se range parmi les cultures très épuisantes. Les racines du manioc rayonnent principalement dans la couche du sol de 0 à 30 cm de profondeur et se distinguent par une grande capacité d'absorption.

Avec une récolte de 50 t/ha de tubercules et d'une masse aérienne de 40 t/ha le manioc emporte du sol 285 kg de N, 132 kg de P_2O_5, 460 kg de K_2O et 225 kg de CaO. Une si forte exportation d'éléments nutritifs indique qu'il est possible d'accroître notablement la récolte de manioc par l'apport d'engrais minéraux.

Au cours de sa période de végétation, le manioc ne consomme pas toujours les éléments nutritifs avec la même intensité. En comparaison de la syntèse de la matière sèche, la consommation de l'azote est beaucoup plus rapide dans la première moitié de la végétation et atteint son maximum au troisième-sixième mois de cette période. D'après Mateo Lopez, au deuxième mois de la végétation la variété semi-hâtive du manioc avait formé 2,9 % de matière sèche (du maximum), tandis que l'assimilation de l'azote était de 18,6 % ; au quatrième mois, respectivement 20,9 % et 70,6 % ; au sixième mois, 42,5 % et 94,0 %.

L'assimilation du phosphore et du potassium est plus étalée dans le temps et dure jusqu'à la fin de la végétation. Vers le sixième mois, la consommation d'azote est les 94 % du maximum (48,4 % de phosphore ; 52,3 % de potassium).

La répartition des éléments majeurs dans les divers organes du manioc au cours de la végétation varie fortement. Dans la première moitié de cette période, l'azote, le phosphore et le potassium s'emmagasinent principalement dans les feuilles et beaucoup moins dans les tiges ; dans la seconde moitié, ils s'accumulent dans les tubercules et les tiges. Comme chez d'autres plantes à tubercules féculents, la pénurie de certains éléments se manifeste par un ralentissement de la croissance des plantes et par une réduction de leur rendement.

L'azote stimule la croissance des rejetons et des feuilles, ainsi que des racines. Un excès d'alimentation azotée accélère fortement la croissance de la masse verte et des racines, tandis que la formation des tubercules se ralentit.

Le phosphore active la synthèse de la fécule, la croissance des tubercules ; le potassium joue le plus grand rôle dans la formation de la récolte et sa qualité.

Ce qui importe pour le manioc, c'est son approvisionnement en potassium, car c'est précisément de ce fait que dépend la teneur des tubercules en amidon et leur récolte par unité de surface. La déficience de potassium dans l'alimentation du manioc entraîne non seulement un ralentissement du transport des glucides dans les organes de réserve et, de ce fait, une faible teneur des tubercules en amidon et la diminution de sa récolte, mais contribue aussi, selon certaines données, à accumuler dans les tubercules des glucosides (tels que la linamarine) renfermant de l'acide cyanhydrique. Un autre facteur important contribuant à augmenter la teneur des tubercules en glucosides est la sécheresse.

L'efficacité des divers genres d'engrais dans la culture du manioc en champ dépend de beaucoup de causes et, en premier lieu, de la façon dont les sols sont pourvus en tel ou tel élément majeur. La

majorité des chercheurs relèvent, sur les sols tropicaux pauvres, une grande sensibilité du manioc à l'apport de potassium et d'azote et une sensibilité assez faible à l'apport de phosphore. Ainsi, sur les sols du Nigeria, le gain de récolte après l'apport d'engrais azotés (50 kg/ha d'azote) ou d'engrais potassiques (70 kg/ha d'oxyde de potassium) était de 14 à 15 % ; après des engrais phosphatés (45 kg de P_2O_5) seulement 2,6 %. Pourtant, sur les sols à faible teneur en phosphates assimilables la réponse du manioc à l'apport de superphosphate augmentait fortement.

Un apport équilibré des éléments de l'alimentation minérale des plantes est d'une grande importance pour la formation d'une bonne récolte de tubercules de manioc. Les plantes bien pourvues en éléments nutritifs ramifient peu et forment une tige dressée. En cas de déficience générale d'éléments nutritifs ou de pénurie d'un seul élément, les plantes se ramifient fortement. De plus, certaines parties aériennes de la plante meurent, car l'élément déficient passe des tissus plus vieux dans les tissus plus jeunes en pleine croissance. Ces plantes sont ordinairement plus sensibles aux maladies et aux parasites.

L'efficacité de divers genres d'engrais augmente considérablement quand ils sont apportés ensemble. Au tableau 83 figurent les résultats d'expériences effectuées par le FFHC du Nigeria.

Tableau 83

Influence de l'engrais complet sur la récolte de tubercules de manioc

Région et variante d'engrais N-P_2O_5-K_2O (kg/ha)	Nombre d'expériences	Récolte témoin (t/ha)	Gain de récolte	
			t/ha	%
Nigeria occidental				
22,4-22,4-22,4	29	8,5	3,2	38
48,4-22,4-22,4	29	8,5	4,0	47
Nigeria central (zone forestière)				
22,4-22,4-22,4	47	15,4	3,9	25
44,8-22,4-22,4	47	15,4	5,0	32
Nigeria oriental				
33,6-33,6-67,3	24	6,8	8,7	128

Les expériences géographiques faites pour étudier l'efficacité d'un engrais minéral complet ont permis d'établir les doses optimales approximatives du mélange NPK dans les divers pays. Par exemple, au Nigeria, les meilleurs résultats sont fournis en apportant à l'hectare 55 kg de N, 45 kg de P_2O_5, 70 kg de K_2O et, au Ghana, 60 kg de sulfate d'ammonium, 120 kg de superphosphate et 60 kg de chlorure de potassium.

Pour le manioc, Jacob et Uexküll conseillent les doses moyennes suivantes d'engrais : 45 à 90 kg/ha de N, 35 à 67 kg/ha de P_2O_5 et

67 à 135 kg/ha de K_2O sous forme de sulfate d'ammonium, de superphosphate et de sel potassique.

Il est recommandé de faire deux apports fractionnés d'engrais minéraux. La première dose sera épandue au moment de la préparation du sol pour planter le manioc. Il est rationnel d'apporter la seconde dose après le deuxième travail des interlignes pour détruire les mauvaises herbes. Dans ce cas, les engrais seront d'abord répandus en bandes dans les interlignes, puis enfouis dans le sol.

Une fumure à la fois organique et minérale donne de bons résultats.

L'igname

Comme toutes les plantes à tubercules l'igname donne de bons rendements et réclame donc beaucoup d'éléments nutritifs. Cependant, les problèmes de l'alimentation minérale de l'igname ne sont pas encore suffisamment étudiés. On a pourtant établi qu'au cours des 5 à 8 premières semaines après la levée, la croissance de l'igname est surtout entretenue aux dépens des substances nutritives contenues dans le tubercule maternel. A mesure que se développe le système radiculaire, les besoins de l'igname en substances nutritives augmentent et les plantes réagissent positivement à l'apport d'engrais.

Selon les recherches d'Irving au Nigeria, un accroissement net de la récolte de tubercules est relié à l'engrais azoté. Pour l'igname, la forme d'azote la plus efficace sont les sels d'ammonium, car les ions ammonium portant une charge positive sont absorbés par le complexe absorbant du sol et sont lessivés moins rapidement que, par exemple, les ions nitrates. Watson conseille d'apporter 125 kg/ha de sulfate d'ammonium (25 kg/ha de N). Mais l'igname peut supporter de plus fortes doses de cet engrais (jusqu'à 75 kg/ha ou 150 kg/ha de N) sans endommager les qualités de la récolte et l'aptitude des tubercules au stockage.

Pourtant, quand le sulfate d'ammonium est fréquemment utilisé, il faut veiller au pH du sol. Cet engrais est physiologiquement acide et il peut acidifier fortement les sols ayant un pouvoir tampon et un pH bas.

L'action des engrais phosphatés et potassiques dépend de la nature du sol et, particulièrement, de sa teneur en formes de phosphore et de potassium assimilables.

L'igname tire assez bien le phosphore des composés du sol et cet élément est rarement un facteur limitant la croissance. En même temps, l'igname répond bien à l'apport de potassium sur tous les types de sols. Mais on ne peut obtenir de bonnes récoltes qu'avec l'apport du mélange complet des engrais minéraux. C'est ce dont témoignent les résultats d'expériences effectuées dans divers pays d'Afrique occidentale selon le programme de FFHC pour l'étude de l'influence des engrais minéraux sur la récolte de tubercules d'igname (tableau 84).

Tableau 84

Influence des engrais minéraux sur la récolte de tubercules d'igname

Région et variante d'engrais, N-P_2O_5-K_2O (kg/ha)	Nombre d'expériences	Récolte témoin, t/ha	Gain de récolte	
			t/ha	%
Nigeria occidental				
22,4-0-0	155	11,0	2,9	26
22,4-0-22,4	663	11,9	2,8	24
44,8-44,8-44,8	202	11,0	3,3	30
Nigeria oriental				
22,4-22,4-22,4	20	3,6	1,6	44
44,8-44,8-44,8	20	3,6	2,8	78
Togo				
22,5-22,5-0	64	6,7	1,2	18
22,5-22,5-22,5	64	6,7	2,1	31
Ghana				
22,4-22,4-22,4	170	7,8	3,5	45
44,8-44,8-44,8	170	7,8	3,8	49
22,4-22,4-22,4	91	5,1	2,3	44
44,8-44,8-44,8	91	5,1	3,7	72

L'igname est également sensible à l'apport de fumier et de composts. Dans certains pays, au Nigeria par exemple, le système d'engrais pour l'igname est constitué principalement par des fumures de composts et de fumier. De bonnes récoltes de tubercules ont été obtenues en apportant 15 t/ha de fumier au moment du principal travail du sol. Mais l'apport conjoint d'engrais organiques et minéraux est plus efficace.

Suivant la quantité d'éléments nutritifs apportés avec les engrais organiques, pour obtenir de bonnes récoltes d'igname il faut encore donner, sous forme d'engrais minéraux, 40 à 60 kg de N, 27 à 36 kg de P_2O_5 et 60 à 80 kg de K_2O par hectare. On utilisera des doses plus fortes d'engrais minéraux si l'igname vient sur des sols cultivés depuis de longues années.

Sur les sols sédimentaires au Nigeria occidental, l'emploi associé de 5 à 10 t/ha de fumier et de 30 à 40 kg/ha de N sous forme d'engrais azotés assure la meilleure récolte d'igname en comparaison de l'apport séparé d'engrais minéraux et de fumier à fortes doses.

Le système de fumure doit tenir compte également de l'utilisation des tubercules à des fins déterminées et de la durée de leur stockage. De fortes doses d'azote, par exemple, plus de 240 kg/ha détériorent les qualités gustatives des tubercules, abaissent leur résistance aux maladies pendant le stockage.

L'efficacité des engrais apportés à l'igname dépend de la fertilité du sol, de la pluviométrie, de la durée de la culture sur le même champ. Sur les sols sablonneux à gros grain, acides et lessivés recevant une forte quantité de pluies (environ 2500 mm) on constate que

l'igname répond mieux à l'azote et au potassium et très peu au phosphore. Mais cette réponse s'améliore sur les argiles mal drainées à acidité et à pluviosité plus faibles.

Quand l'igname est longtemps cultivé sur un même terrain (jusqu'à 6-7 ans) l'efficacité du potassium à des doses jusqu'à 130 kg/ha s'accroît à partir de la troisième année en raison de la diminution de la teneur du sol en potassium. Une culture prolongée de l'igname par reproduction végétative provoque une forte baisse des réserves d'azote dans le sol, étant donné qu'après la première saison des pluies la quantité de nitrates dans le sol décroît fortement.

La meilleure période pour épandre les engrais sous igname est celle qui précède le semis, avec leur enfouissement dans les sillons ou sur billons à une profondeur de 8 à 10 cm. En même temps, on utilise largement l'épandage en couverture, à la volée dans les interlignes ou directement sous la plante. Cet apport est fractionné, de 6 à 8 semaines après la levée et 3 ou 4 mois après le premier épandage.

La patate douce

Pour former une bonne récolte la patate douce, comme toutes les cultures à tubercules, a besoin d'une assez grande quantité d'éléments nutritifs. Selon Wrigley, la patate douce emporte du sol avec une récolte de tubercules de 168 q/ha, 74 kg de N, 19 kg de P_2O_5 et 108 kg de K_2O.

Au cours de la végétation, les organes aériens et souterrains ne consomment pas la même quantité d'éléments majeurs. Dans la première période de végétation (avant le grossissement et au début du grossissement des racines), ce sont les organes aériens qui consomment le plus d'éléments majeurs. Dans la deuxième période de végétation, quand les tubercules grossissent, la teneur des feuilles et des tiges en éléments majeurs baisse, tandis qu'elle s'élève dans les tubercules. La teneur en azote (en pour cent de matière sèche) dans les tubercules est deux fois plus élevée que dans les tiges et les feuilles (tiges et feuilles : 0,8 % ; racines : 1,8 %) ; la teneur en phosphore (P_2O_5) est neuf fois plus élevée (9,15 et 1,1 % respectivement) ; la teneur en potassium (K_2O) est près de trois fois plus élevée dans les tubercules que dans les feuilles et les tiges.

Parmi les éléments majeurs, le potassium joue le plus grand rôle pour la vie de la patate douce en influant sur les principaux processus physiologiques de la plante, surtout dans la période de grossissement des tubercules et de formation de la récolte. En pénurie de potassium l'intensité de la photosynthèse baisse ; par contre celle de la respiration des feuilles augmente. Un accroissement du taux du potassium dans le milieu nutritif réduit l'intensité de la respiration, augmente celle de la photosynthèse et accélère la croissance des plantes. En expérience végétative, quand on apporte une dose entière de potassium la surface assimilante des feuilles et des racines s'accroît, la croissance des rejetons et le grossissement des racines se

font à des rythmes accélérés. Le potassium favorise le transport des produits de la photosynthèse dans les organes de réserve. En sa carence les tubercules diminuent, la teneur en fécule baisse.

La déficience de potassium se manifeste par le jaunissement des feuilles, l'apparition d'une nuance bronzée d'abord sur les bords, puis au centre de la feuille. Les feuilles se déforment et meurent. La sensibilité des plantes à un apport d'engrais potassiques est déterminée, avant tout, par son taux dans le sol. Ainsi, sur les sols gris riches en potassium (40 à 50 mg pour 100 g de sol), l'efficacité des engrais potassiques est très basse. En même temps, sur les sols alluvionnaires (8 mg de K_2O pour 100 g de sol) l'efficacité des engrais potassiques s'accroît considérablement (tableau 85).

Tableau 85

Influence des engrais sur la récolte de patate douce, U.R.S.S.

Variantes	Tubercules, t/ha	Fécule, t/ha
Témoin (sans fumure)	17,8	3,3
$N_{30}P_{90}$	22,1	4,2
$N_{30}K_{120}$	25,2	4,8
$P_{90}K_{120}$	21,6	4,3
$N_{30}P_{90}K_{120}$	24,4	5,0

L'azote accroît l'efficacité des engrais potassiques. Les mélanges azote-potassium favorisent une augmentation du nombre et de la masse des tubercules. Le rôle de l'azote est particulièrement grand dans la constitution de la masse des organes aériens. La réaction de la patate douce à l'apport d'azote est généralement positive. Mais de fortes doses d'azote produisent une récolte surabondante de feuilles et de tiges, alors que la récolte de tubercules se trouve réduite.

L'efficacité des engrais azotés dépend du niveau de fertilité du sol. Il est plus avantageux d'apporter de fortes doses d'azote, jusqu'à 80 kg à l'hectare, sur les sols pauvres, tandis que sur les sols moyennement fertiles on donnera 30 à 40 kg/ha.

La patate douce consomme relativement peu de phosphore du sol et réagit faiblement à l'apport d'engrais phosphatés. Cependant, sur les sols pauvres en phosphore l'épandage d'engrais phosphatés est très recommandable. Le phosphore favorise un meilleur développement des racines, ainsi que l'accroissement de la masse des tubercules et leur enrichissement en fécule. Quand l'alimentation en phosphore est optimale, les plantes résistent mieux aux maladies.

En pénurie de phosphore, les feuilles de la patate douce deviennent vert foncé et leurs nervures prennent une teinte rouge à l'envers. Une nécrose brune sur les bords de la feuille caractérise une carence en phosphore.

Sous les tropiques on rencontre une déficience de magnésium et de soufre. La carence en magnésium se manifeste par des taches jaune pâle au début sur le bord, puis au centre du limbe de la feuille. Les taches jaunes prennent peu à peu une couleur orangée. En déficience de soufre les tiges s'allongent et s'amincissent, les feuilles sont d'abord vert pâle, puis jaunissent.

D'après Johnes, l'insuffisance des différents éléments nutritifs se manifeste chez les plantes quand leur taux dans les feuilles est (calculé en masse sèche): azote — 1,5 % ; P_2O_5 — 0,1 % ; K_2O — 0,5 % ; Mg — 0,05 % ; Ca — 0,2 % ; S — 0,08 %.

Le **système de fumure de la patate douce** consiste en fumure de base et en fumures d'appoint. La fumure de base se fait avant ou pendant le semis ; les fumures d'appoint, une fois que les plantes ou les boutures ont pris racine.

Les engrais organiques, surtout le fumier frais, favorisent davantage la croissance abondante de la partie aérienne des plantes. On conseillera donc de les donner sous la culture précédente. D'autant plus que la patate douce utilise bien le posteffet du fumier apporté sous la culture précédente.

Les proportions et les doses de N, P_2O_5 et K_2O dans les mélanges d'engrais sont variées suivant les résultats de l'analyse du sol.

Les proportions les plus souvent utilisées sont 1 :1 :1 sur les sols pauvres ; 1 :2 :2 sur les sols moyennement fertiles ; 1 :2 :3 ou 1 :3 :6 sur les sols pauvres en potassium. Voici quelques exemples de doses pour les divers engrais : azote — 20 à 60 kg/ha ; phosphore — 30 à 90 kg/ha ; potassium — 40 à 120 kg/ha. Dans chaque cas concret, ces doses seront précisées.

Il est plus rationnel d'apporter les engrais phosphatés et potassiques avant la plantation de la patate douce et l'engrais azoté comme fumure d'appoint après l'apparition des jeunes pousses.

En Afrique tropicale, on n'apporte encore que les engrais locaux. Les meilleurs accroissements de récolte de tubercules sont obtenus avec un apport de 170 à 300 kg du mélange NPK par hectare (azote — 22 à 45 ; phosphore — 70 à 120 ; potassium — 80 à 120 kg/ha).

L'apport fractionné des engrais au cours du dernier ameublissement du sol avant la plantation, dans les sillons au moment des semis et en fumure d'appoint, donne le meilleur résultat.

LES LÉGUMINEUSES À GRAIN

Grâce aux bactéries des nodosités qui se développent sur leurs racines, les légumineuses sont capables de fixer l'azote atmosphérique et n'ont d'ordinaire pas besoin d'engrais azotés.

Au cours de leur végétation, les légumineuses emportent du sol beaucoup plus d'éléments nutritifs que les céréales, par exemple. Pour un même rendement, la quantité d'éléments nutritifs, surtout d'azote, contenue dans la récolte de légumineuses à grain est aussi beaucoup plus élevée. Il s'exporte en moyenne du sol (en kg) pour

10 q de grain et la quantité correspondante de paille :

	N	P_2O_5	K_2O
Avoine, orge	31	12	25
Pois, vesce	65	15	18
Lupin	68	19	47

Les légumineuses consomment beaucoup plus de phosphore et de potassium que les graminées. De plus, leurs racines absorbent mieux le phosphore que les composés potassiques. Les variétés de soja et de haricot poussant en touffes, par exemple, sont très exigeantes en potassium (l'exportation sur 1 hectare atteint 130-150 kg). L'apport d'engrais phosphatés accroît la récolte et réduit la durée de maturation des légumineuses, ce qui est particulièrement important pour leur culture en saison humide.

Chez les légumineuses, la consommation des éléments nutritifs se fait parallèlement à la formation de matière sèche. Le potassium fait exception, son assimilation est beaucoup plus rapide que la synthèse de matière organique. La consommation des éléments nutritifs par les plantes atteint un maximum en fin de floraison et au début de la formation des graines.

Les légumineuses à grain assurent une bonne part (de la moitié aux deux tiers) de l'azote aux dépens de sa fixation symbiotique. La quantité d'azote biologique accumulé dans la récolte, dans le chaume et les racines restant dans un champ de légumineuses dépend de leur espèce et de leur aptitude à fixer l'azote.

Les légumineuses fixent l'azote avec le plus d'intensité sur les terres neutres, à condition que les semences soient contaminées par des races actives de bactéries de nodosités et qu'il y ait un niveau suffisant d'alimentation en phosphore et en potassium et surtout en molybdène, oligo-élément prenant part à la fixation de l'azote.

En réaction acide du milieu et lorsque le sol renferme en grande quantité de l'azote minéral, la formation de nodosités sur les racines des légumineuses est limitée et la fixation de l'azote atmosphérique baisse. Dans ce cas, les légumineuses à grain forment la récolte surtout aux dépens de l'azote du sol, et la quantité d'azote atmosphérique restant dans les chaumes et les restes de racines ne couvre pas l'exportation de cet élément des réserves du sol.

Dans des conditions favorables à la fixation de l'azote, les légumineuses à grain satisfont leurs besoins aux dépens de l'azote atmosphérique et forment une récolte élevée. Dans le sol, les chaumes et restes de racines riches en azote se décomposent progressivement et améliorent l'alimentation azotée des cultures succédant aux légumineuses dans l'assolement.

L'apport d'azote au semis en petite quantité est très utile au début de la végétation, avant la formation de nodosités sur les racines. A cette période, (apparition des premières vraies feuilles) l'azote des cotylédons est déjà utilisé, les bactéries fixatrices d'azote ne se sont pas encore développées et consomment elles-mêmes l'azote des

plantes. En pénurie d'azote dans le sol, au début de la végétation apparaissent des signes de carence en azote. C'est pourquoi l'apport d'une petite quantité d'azote (10 à 30 kg/ha) produit, à cette époque, un bon effet. Cependant, à de plus fortes doses l'azote peut réprimer la fixation de l'azote atmosphérique par les plantes et provoquer un fort développement de leur masse végétative et retarder ainsi la maturation.

Les engrais phosphatés et potassiques doivent être enfouis au labour à la dose de 45-60 kg à l'hectare. L'apport d'une petite dose de superphosphate granulé (0,5 q/ha) sur les lignes au semis assure l'alimentation des plantes en phosphore à la période initiale de la croissance.

Sous l'influence des engrais phosphatés et potassiques les légumineuses à grain fixent davantage l'azote atmosphérique, leur croissance s'améliore et la récolte augmente considérablement. Les légumineuses à grain, surtout le soja, le haricot et la vesce répondent bien à un apport de fumier. Le rendement du haricot par exemple, après l'épandage de fumier augmente en moyenne, de 3 q et plus; celui du soja, de 2 à 5 q/ha. Pour le pois, il vaut mieux épandre le fumier sous la culture précédente.

Les légumineuses à grain sont sensibles à l'acidité du sol. Elles ne se développent bien que sur des sols à réaction neutre ou faiblement alcaline (pH 6,5-8,0). Un apport de chaux aux terres acides est donc indispensable.

Pour obtenir de bonnes récoltes de légumineuses à grain il faut apporter au sol des engrais au molybdène sur les terres pauvres en cet élément sous une forme assimilable.

Le haricot commun. Dans les deux premiers mois de la végétation, le haricot commun consomme jusqu'à 90 % du phosphore, du potassium et du calcium qui lui sont nécessaires. Le besoin d'azote augmente fortement à la floraison, il faut beaucoup d'azote à la période de formation et de croissance des gousses. Le haricot réagit bien aux engrais organiques. Sous l'influence du fumier, la récolte de graines augmente de 50 à 100 %. En U.R.S.S., par exemple, il est recommandé d'apporter le fumier au haricot aux doses de 15 à 20 t/ha sur les chernozems, de 25 à 30 t/ha sur les podzols engazonnés et les sols gris forestiers. Aux U.S.A., un apport de 10 t/ha de fumier fait augmenter la récolte de graines de 14 à 16 q/ha.

Le haricot répond très bien aux engrais potassiques et surtout phosphatés. Parmi les engrais potassiques, c'est le sulfate de potassium qui présente le plus d'intérêt. Le phosphore favorise une floraison abondante et compacte, la formation des gousses et des graines. Sous les tropiques, on conseille un apport d'engrais phosphatés et potassiques de 60 kg/ha de P_2O_5 et de 40-80 kg/ha de K_2O mélangé à 10 à 30 kg/ha de N. L'apport d'engrais azotés est particulièrement utile sur les sols pauvres.

Le haricot de Lima. Cette variété de haricot réagit également bien aux engrais organiques et minéraux. Il est recommandé d'ap-

porter les engrais azotés sur les sols pauvres et les terres vierges. On pourra apporter les engrais phosphatés aux doses de 60 à 70 kg/ha de P_2O_5 aux semis de haricot de Lima sur la plupart des sols tropicaux. Les engrais potassiques aux doses de 120 kg/ha sont particulièrement efficaces sur les sols sablonneux et les limons sableux pauvres en potassium. De bons résultats sont fournis par l'enfouissement d'engrais phosphatés et potassiques dans le sol un mois avant le semis.

Le haricot doré (mach), réagit bien à l'apport d'engrais phosphatés et de fumier. Il est efficace d'apporter à cette culture 6 à 12 t/ha de fumier ou 5 à 10 t/ha de compost. Les normes d'engrais phosphatés sont de 20 à 30 kg/ha de P_2O_5. On apporte parfois l'engrais azoté à petite dose (5 à 10 kg/ha de N) pour accélérer au début la croissance des plantes.

Le dolique. Cette culture répond bien à un engrais phosphaté et à l'apport de petites quantités de sels de molybdène. Dans de nombreux pays de la zone tropicale il est recommandé d'apporter au dolique au début de la végétation (quand la hauteur des plantes atteint 20 cm) une petite quantité d'engrais azotés.

Au Nigeria on apporte aux sols riches en azote 165 à 440 kg/ha d'engrais minéral de composition 0-10-30. En pénurie d'azote on donne 190 à 250 kg/ha d'engrais de composition 20-40-20. Les engrais sont épandus à une distance de 5 cm des lignes au semis ou deux semaines plus tard. On utilise d'ordinaire des engrais complexes. Un chaulage stimulera la formation de nodosités.

La canavalia. Une récolte de 35 t de masse verte de canavalia exporte d'un hectare 200 kg de N, 25 kg de P_2O_5 et 55 kg de K_2O. A Zimbabwe on a relevé une grande sensibilité de la canavalia aux engrais azotés et phosphatés. Au Kenya, on conseille d'apporter au sol avant de semer la canavalia 100 kg/ha de superphosphate double. Il est recommandé de donner les engrais organiques à la culture précédente.

Les pois chiches. Cette culture répond bien aux engrais organiques qui accroissent la récolte de grain et diminuent l'atteinte des plantes par le wilt. Parmi les engrais minéraux, ce sont les phosphates qui conviennent le mieux. Les engrais azotés ne sont donnés qu'en petite quantité. Les engrais potassiques ne seront épandus que sur les sols pauvres en potassium.

En Algérie, par exemple, on apporte ordinairement aux pois chiches l'engrais minéral complet à la dose de 7 à 12 kg de N, 80 à 85 kg de P_2O_5 et 50 à 70 de K_2O à l'hectare. En Tunisie, on n'apporte que des engrais phosphatés à la dose de 75 à 80 kg de P_2O_5 à l'hectare.

Le soja. Le soja est plus exigeant envers la fertilité du sol que la plupart des légumineuses à grain des tropiques. Une récolte de 20 q de graines de soja et de la quantité correspondante de masse aérienne emporte d'un hectare 142 kg de N, 32 kg de P_2O_5 et 35 kg de K_2O. Les plantes réagissent très bien à l'apport au sol d'engrais, organiques et minéraux. En U.R.S.S., par exemple, le soja répond bien

à l'apport de fumier (à la dose de 10 à 20 t/ha), ainsi qu'à des doses élevées d'engrais phosphatés (45 à 60 kg de P_2O_5 à l'hectare) et potassiques (jusqu'à 60 à 90 kg/ha de K_2O). Il réagit également bien à de faibles doses d'engrais azotés, surtout apportés avec des engrais phosphatés et potassiques. Le traitement des semences par une solution de sels de molybdène et une fumure d'appoint au superphosphate par les feuilles accroissent la récolte de fèves de soja.

L'efficacité d'un apport au soja d'engrais azotés et potassiques dépend de la façon dont les plantes sont pourvues en phosphore.

La réaction du soja aux engrais azotés est également déterminée par le taux du calcium et l'humidité du sol. La sensibilité des plantes à un apport d'azote augmente sur les sols pauvres en calcium et aux saisons chaude et sèche qui freinent la fixation symbiotique de l'azote.

Sur les chernozems ordinaires un apport de 35 à 70 kg/ha d'azote fait augmenter la récolte de fèves de 2,6 à 4,7 q/ha ; sur les chernozems lessivés, de 1,7 à 3,1 q/ha ; sur les sols alluvionnaires, de 1,5 à 2,7 q/ha. Les engrais phosphatés et potassiques exercent sur ces sols beaucoup moins d'influence que les engrais azotés.

Au Nigeria, le soja répond bien à l'apport d'engrais phosphaté. C'est pourquoi, sur les sols moyennement et peu fertiles on apporte 50 à 100 kg/ha de phosphore. Des doses initiales d'azote de 20 kg/ha sont recommandées. En cas de nécessité, on apporte du nitrate ammoniaco-calcique à raison de 100 à 120 kg/ha. Tous les engrais sont d'habitude donnés au semis à une distance de la ligne de 4 à 5 cm.

CHAPITRE 8

LES MÉTHODES DE RECHERCHE AGROCHIMIQUE

Les principales méthodes de recherche agrochimique peuvent être divisées en deux groupes : biologiques et de laboratoire utilisées conjointement et se complétant les unes les autres.

Les **méthodes biologiques** (comprenant l'expérience en champ, les méthodes de pot expérimental et lysimétrique) permettent, selon l'expression de Timiriazev, de « demander à la plante même son avis ».

L'*expérience en champ* est une méthode de recherche réalisée dans la nature sur une parcelle spéciale afin d'établir l'action quantitative des conditions ou des procédés de culture (séparément ou associés) sur la récolte des plantes cultivées. Les expériences en champ sur les engrais permettent de déterminer l'action exercée par les engrais sur le volume et la qualité de la récolte, la fertilité du sol. L'expérience en champ est la méthode fondamentale d'étude de l'efficacité des engrais (certaines de leurs variétés ou combinaisons, de formes, doses, etc.) dans des conditions pédoclimatiques variées et suivant les facteurs agrotechniques et d'autres.

La *méthode de pot expérimental* permet d'étudier l'action des engrais dans des conditions de culture contrôlées, de mettre en évidence l'action de divers facteurs et d'étudier l'effet qu'ils exercent sur la croissance, le développement, le métabolisme, l'alimentation et la récolte des plantes. Dans les expériences de végétation, les plantes sont cultivées dans des laboratoires de végétation ou sous treillis sur milieux artificiels dans des récipients d'eau, de sable ou de sol. Dans ces conditions on peut contrôler et régler strictement les conditions d'alimentation des plantes et, à un certain point, les conditions du milieu extérieur : régime d'humidité, d'éclairage, de température, etc.

La *méthode lysimétrique* permet, dans des conditions naturelles et, au moyen de dispositifs spéciaux, lysimètres, de déterminer la circulation et le passage de l'eau à travers une couche de sol. Dans les recherches agrochimiques, la méthode lysimétrique est utilisée pour étudier le régime hydrique dans les expériences sur les engrais, le niveau du lessivage des sels minéraux du sol et des engrais épandus, pour faire une appréciation quantitative du bilan des substances nutritives dans le sol : comparaison de leur apport et de l'exportation par les plantes et les déperditions.

Les *méthodes de laboratoire de l'analyse agrochimique* des plantes, des sols et des engrais sont tout à fait variées. Outre les méthodes

chimiques et instrumentales d'analyse qualitative et quantitative, on utilise largement, dans les recherches agrochimiques, les méthodes biochimiques, microbiologiques, les isotopes indicateurs stables et radioactifs. Parmi les méthodes de laboratoire, le rôle dirigeant dans les expériences agrochimiques appartient à l'analyse chimique.

Pour apprécier la précision des expériences et l'authenticité des résultats obtenus, élucider la relation entre engrais et récolte, simuler les processus d'absorption, de transformation dans le sol et de déperdition des éléments fertilisants du sol et des engrais, dans les recherches agrochimiques on fait appel aux méthodes mathématiques.

L'EXPÉRIENCE EN CHAMP

Genres d'expériences en champ

Suivant le lieu et les conditions de l'expérience, son but, sa durée et le nombre des facteurs étudiés on distingue plusieurs genres d'expériences en champ sur les engrais.

Les *expériences stationnaires* sont faites sur des parcelles permanentes spécialement équipées. Elles s'accompagnent généralement d'observations complémentaires et de recherche de laboratoire en vue d'examiner les différences relevées dans l'action des engrais et autres facteurs. Dans les expériences stationnaires, on étudie l'apport systématique d'engrais dans les assolements ou sur une culture menée sur le même champ pendant plusieurs années. Le plus souvent, ces expériences sont échelonnées sur plusieurs années. Leurs résultats sont une base fiable pour la mise au point de recommandations sur l'usage des engrais dans la zone où elles sont effectuées.

Les *expériences au cours de la production* sont effectuées directement dans les exploitations, elles permettent d'établir l'action des engrais sur la récolte et sa qualité dans les conditions de l'exploitation. Elles servent à vérifier et à préciser les résultats obtenus dans les expériences stationnaires dans des conditions concrètes et sont utilisées pour apprécier l'efficacité non seulement agronomique, mais aussi économique des engrais.

Dans les *expériences unifactorielles* on étudie l'action d'un procédé quelconque (soit le genre, la forme ou la dose d'engrais sur un arrière-fond agrotechnique invariable, soit l'action d'un des facteurs agrotechniques, toutes autres conditions restant les mêmes). Dans les *expériences plurifactorielles* on étudie l'action de plusieurs facteurs et de leurs associations (par exemple, les genres et doses d'engrais à employer suivant les conditions d'irrigation, etc.).

Suivant leur durée, les expériences peuvent être *brèves* ou *étendues sur de nombreuses années*. Dans les expériences brèves, on étudie l'action des engrais ou de certains procédés de culture au cours de 2 ou 3 ans dans des conditions pédologiques analogues et suivant le même schéma. Les expériences d'une année ne durent qu'une seule saison de végétation. Si la même expérience est répétée les années suivantes sur une nouvelle parcelle dans des conditions analogues

et qu'on ne tienne compte que de l'action directe du facteur étudié, l'expérience est également considérée comme annuelle. L'authenticité et la valeur des résultats de l'expérience augmentent si elle est poursuivie pendant longtemps, ce qui exclut l'action de facteurs météorologiques occasionnels sur l'efficacité des engrais ou des procédés étudiés. Les expériences de longue durée en champ sont généralement pluriannuelles (à l'exception des expériences auxiliaires préalables ou des expériences dites de reconnaissance). Seules les expériences de plusieurs années permettent d'élucider le posteffet des engrais organiques et minéraux, des procédés d'amendement chimique des terres, l'influence de l'emploi systématique d'engrais sur la productivité de l'assolement, les propriétés du sol, etc. Les expériences en champ *uniques* sont menées indépendamment les unes des autres en différents points suivant des schémas différents et d'après un programme particulier d'observation et de recherche.

Les expériences en champ *massives* sont menées suivant le même schéma et sur le même thème simultanément en plusieurs points. Afin d'élucider les lois de l'action des engrais et d'autres procédés agricoles suivant les conditions pédoclimatiques, les expériences en champ massives sont effectuées suivant le principe géographique, tant dans le territoire du pays entier, que suivant les régions naturelles et économiques. Le réseau géographique des expériences multilocales sur les engrais, menées par des centres de recherche dans différentes zones géographiques du pays suivant un programme concerté et une méthode unique, permet d'obtenir les données indispensables pour planifier la répartition des engrais minéraux suivant les zones et pour fonder scientifiquement l'usage des engrais. Le thème fondamental du réseau géographique des expériences en champ est :

— étudier l'efficacité de l'emploi systématique d'engrais minéraux et organiques dans les assolements, afin de donner une base scientifique des systèmes de mesures à prendre pour accroître la récolte de plantes cultivées et la fertilité du sol ;

— étudier les doses et les proportions des principaux genres d'engrais minéraux (azotés, phosphatés, potassiques) pour établir les besoins d'engrais dans les différentes zones du pays, compte tenu de leurs conditions pédoclimatiques et de la spécialisation dans l'agriculture ;

— étudier les procédés d'apport des engrais aux cultures principales suivant les différentes conditions pédoclimatiques ;

— apprécier l'efficacité des nouveaux genres et formes d'engrais.

Les *expériences collectives massives* sont poursuivies simultanément en de nombreux points suivant le même schéma et la même méthode afin d'étudier l'influence du niveau d'agrotechnique, du degré de culture des terres, d'autres conditions naturelles et économiques sur l'efficacité des engrais. De telles expériences sont effectuées en U.R.S.S. sur une large échelle par les laboratoires agrochimiques de zones dans les exploitations ayant des conditions naturelles et économiques types dans les limites de la zone desservie.

Principales exigences méthodiques dans l'accomplissement d'expériences en champ

L'expérience doit être typique. Les conditions de l'expérience en champ doivent correspondre aux conditions pédoclimatiques, organisationnelles, agrotechniques de l'aire d'application de ses résultats. Ceci veut dire que l'expérience en champ doit être accomplie sur les sols les plus répandus, ayant le plus d'importance agricole, typiques de l'expérience effectuée, avec une agrotechnique type et une culture typique de la zone et de la région, des variétés les plus productives sur prédécesseurs typiques et convenant le mieux.

L'exigence d'un caractère typique de l'expérience conditionne également sa durée, étant donné que, certaines années, les conditions météorologiques peuvent ne pas être habituelles.

Les résultats doivent être comparables et il faut observer le principe d'une différence unique. L'expérience en champ doit être menée de façon qu'en comparant les récoltes et les résultats des observations de la croissance et du développement des cultures on puisse tirer des conclusions tout à fait déterminées sur l'action des facteurs étudiés. Le schéma de l'expérience en champ y compris une variante standard (ou témoin) et des variantes d'étude des engrais ou des procédés doit être établi de façon que les variantes comparées ne se distinguent que par un seul facteur, toutes autres conditions restant égales. En ce qui concerne l'expérience en champ sur les engrais, ceci signifie que différentes formes d'engrais doivent être obligatoirement comparées à des doses diverses (en même temps que de fortes et faibles doses de l'engrais en comparaison duquel est évaluée l'action de la forme essayée) et quand on étudie l'efficacité de différentes doses d'engrais, ces doses doivent être épandues sous la même forme. Cependant, l'exigence d'observer le principe d'une différence unique ne doit pas entraîner une restriction des conditions dans lesquelles les engrais ou les procédés étudiés peuvent garantir leur maximum d'action.

Exactitude et certitude de l'expérience. Les résultats quantitatifs obtenus dans l'expérience en champ (volume de la récolte, ses indices qualitatifs, importance de l'exportation des éléments fertilisants, etc.) peuvent, par suite d'erreurs diverses, différer de leurs justes valeurs. Les erreurs relatives au volume de la récolte peuvent être dues à une mesure inexacte de la surface de la parcelle et à une pesée incorrecte; elles peuvent être dues à l'imprécision des instruments et des appareils de mesure utilisés. Ces erreurs augmentent à mesure que la surface de la parcelle diminue. Les erreurs peuvent être dues à l'hétérogénéité du sol du terrain d'essais, à des influences de microrelief, à une préhistoire différente du terrain. L'erreur d'expérience due à la fertilité inégale du sol peut être réduite par un choix bien conçu du nombre des répétitions de variantes d'expérience, de forme et de surface des parcelles, de leur situation sur le terrain d'essais. Des erreurs occasionnelles au cours des différents travaux de l'expérience (pertes de semences sur les parcelles, inondation ou

autres endommagements des semis) ne sont pas non plus exclues. Dans ce cas, on ne prend pas en considération la récolte sur une partie de la parcelle ou même celle sur plusieurs parcelles à la fois.

L'authenticité de l'expérience est appréciée par vérification de la façon dont la méthode de recherche adoptée correspond à la tâche proposée. L'authenticité des différences entre les indices quantitatifs obtenus au cours de l'expérience, de même que la précision de l'expérience, sont établies par traitement mathématique des résultats au moyen des méthodes de statistique variationnelle.

Exigences envers la documentation sur l'expérience en champ. Le document principal est le journal de l'expérience dans lequel, sous une forme établie, sont fixées toutes les données concernant le schéma de l'expérience et le programme des travaux, la caractéristique du terrain d'essais, tous les travaux et observations, les matériaux statistiques et des mesures. Ces données sont portées au journal de l'expérience en champ soit directement au fur et à mesure de leur obtention, soit sur la base des procès-verbaux des expériences en champ dans lesquels sont obligatoirement inscrites toutes les données primaires au moment de l'exécution des travaux.

Choix et préparation du champ d'essai, établissement de l'expérience en champ

Pour effectuer l'expérience en champ on choisit un terrain égalisé (sans pente et sans dépression fermée), au sol typique pour l'exploitation ou la région données, homogène par ses caractéristiques génétiques et ses propriétés et dont la préhistoire est bien connue. Le degré d'hétérogénéité du terrain est apprécié par la carte du sol, par les résultats existants d'investigation agrochimique des sols ou par des analyses chimiques spéciales du sol. Avant d'installer les expériences stationnaires on exécute au préalable des semis de reconnaissance pour étudier en détail l'hétérogénéité du terrain. Pour effectuer un semis d'orientation, on utilise des semis en plein, sensibles aux variations de fertilité du sol et plus résistants aux intempéries. Afin de mettre en évidence l'hétérogénéité du terrain d'essai on fait un calcul de la récolte procurée par le semis de reconnaissance en le divisant en plusieurs parcelles. La surface d'une parcelle ne doit pas dépasser celle des parcelles expérimentales.

Afin d'éviter des erreurs fortuites, le terrain d'essai doit être suffisamment éloigné de la forêt ou de groupes d'arbres isolés, des routes, des bassins d'eau, des locaux d'élevage, etc.

Le terrain choisi d'un niveau de fertilité partout égal est divisé en parcelles expérimentales rectangulaires de la même superficie et de la même forme. Le nombre des parcelles est égal au produit du nombre de variantes et de leurs répétitions. La surface et la forme des parcelles d'essai sont choisies en accord avec l'hétérogénéité du terrain, le but de l'expérience et les exigences envers l'exactitude,

le genre de culture et l'agrotechnique appliquée. Les dimensions et la forme de la parcelle doivent permettre d'observer une agrotechnique normale pour la culture choisie avec utilisation des machines agricoles nécessaires. Ordinairement, la superficie d'une parcelle d'essai pour une culture en plein est environ de 100 m^2 ; pour les plantes sarclées, environ de 200 m^2. La forme allongée est la plus répandue pour les parcelles, car elle embrasse plus entièrement l'hétérogénéité du terrain. Si la superficie des parcelles d'essai est réduite, leur forme sera de préférence carrée. Outre les facteurs mentionnés, la forme de la parcelle dépend aussi des dimensions des bandes protectrices. Afin d'éliminer l'influence marginale des plantes (celles qui poussent sur les bords de la parcelle sont dans des conditions différentes de celles qui poussent au milieu), une diminution des erreurs de l'expérience par transfert du sol au cours de son travail, un retrait des engrais lors de leur apport sur les parcelles ou leur déplacement avec le sol le long du périmètre des parcelles expérimentales, on réserve des bandes protectrices. Dans les expériences de courte durée sur les engrais la largeur de ces bandes des deux côtés des parcelles doit être au moins de 0,75 m (le double pour des parcelles contiguës — 1,5 m); pour les expériences durant plusieurs années au moins de 1,0 m (le double — 2,0 m). Pour les cultures sarclées on réserve des deux côtés de la parcelle une bande de protection de la largeur de deux interlignes (2 rangées de plantes avec la surface d'alimentation correspondante). Au semis ou à la plantation le long du grand côté de la parcelle, sa largeur doit être un multiple de la largeur de la semeuse. L'apport d'engrais et le semis doivent se faire sur toute la largeur des parcelles d'essai, c'est-à-dire que les bandes de protection sont fumées, travaillées et ensemencées en même temps que toute la parcelle. Les plantes des bandes de protection sont récoltées avant de faire le compte de la récolte et la superficie de la parcelle dont il est tenu compte est égale à la surface totale moins la surface des bandes protectrices. Plus la parcelle est allongée, plus grande est l'aire des bandes protectrices et moins grande est celle qui sert aux calculs. Une méthode correcte est de réserver pour les bandes protectrices 25 % de la surface du terrain d'essai.

Hors de la surface des parcelles d'essai on prévoit, pour le virage des machines et des engins, des deux côtés de la parcelle des bandes protectrices de 10 m au moins pour la traction mécanique et de 6 m pour la traction animale. Ces bandes protectrices sont ensemencées et travaillées en même temps que toute la surface des parcelles d'essai. L'exactitude de l'expérience dépend fortement de sa répétition dans l'espace, de la répartition de chaque variante de l'expérience sur plusieurs parcelles identiques. Les expériences en champ sur les engrais sont ordinairement répétées 4 fois quand les parcelles ont 200 m^2 (et 6 fois pour les cultures potagères), ce qui permet d'obtenir une exactitude d'expérience de 2 %-4 %. Deux ou trois répétitions sont admises dans les expériences préalables, de reconnaissance ou de démonstration, ainsi que dans des essais de production sur des

parcelles de plus de 1000 m². Les expériences stationnaires ne sont jamais répétées moins de 4 fois. Lorsque l'aire de la parcelle est réduite, l'expérience doit être répétée plus souvent (sur des parcelles de 10-20 m² et, *a fortiori*, sur de très petites parcelles de moins de 10 m², le nombre de répétitions augmente jusqu'à 6-8). On admet généralement que l'expérience en champ ne relève pas des différences de moins de 5 %. La précision de l'expérience peut être augmentée avec une plus grande surface et de plus nombreuses répétitions (tableau 86). La répartition des répétitions et des variantes de l'expé-

Tableau 86

Influence de la surface de la parcelle et du nombre de répétitions sur l'erreur de l'expérience (d'après Remer)

Augmentation de la surface de la parcelle sans répétitions		Augmentation des répétitions pour la même surface de la parcelle (25 m²)	
Surface de la parcelle, m²	erreur, %	répétitions	erreur, %
25	10,0	1	10,0
50	8,3	2	7,1
100	7,1	3	5,8
150	6,4	4	5,0
200	5,9	6	4,1
250	5,6	8	3,5

rience doit englober le mieux possible toute l'hétérogénéité de la fertilité du sol sur le terrain et assurer les meilleures conditions pour comparer les variantes. Dans les expériences en champ sur les engrais, le plus souvent les répétitions sont réparties serrées par la méthode en plein, les différentes répétitions ayant des limites communes. Les répétitions de l'expérience peuvent être réparties sur un, deux ou plusieurs rangs.

A l'intérieur des répétitions, les parcelles des variantes peuvent être disposées soit systématiquement (dans un certain ordre d'alternance), soit au hasard, sans ordre. Dans les expériences sur les engrais dans les assolements on doit assurer l'alternance, non seulement dans l'espace, mais aussi dans le temps.

Schémas d'expériences en champ sur les engrais

Etude des genres d'engrais. L'étude de trois genres d'engrais se fait suivant le schéma classique en huit : 1) 0 ; 2) N ; 3) P ; 4) K ; 5) NP ; 6) NK ; 7) PK ; 8) NPK. Suivant le même principe, on peut établir le schéma de l'expérience pour l'étude de l'action de n'importe lequel de trois facteurs, par exemple : engrais, arrosage, variété :

1) variété standard sans engrais et sans arrosage ; 2) variété standard + engrais ; 3) variété standard + arrosage ; 4) variété standard + engrais + arrosage ; 5) variété nouvelle sans engrais

et sans arrosage ; 6) variété nouvelle + engrais ; 7) variété nouvelle + + arrosage ; 8) variété nouvelle + engrais + arrosage.

Si l'on est informé que le sol est bien pourvu en l'un des trois principaux éléments fertilisants, en potassium, par exemple, le schéma en huit peut être réduit sans dommage à cinq variantes : 1) 0 ; 2) N ; 3) P ; 4) NP ; 5) NPK.

Si l'on se propose d'étudier l'action d'un genre quelconque d'engrais, le phosphore, par exemple, le schéma en huit est ramené à 4 variantes :

1) 0 ; 2) P ; 3) NK ; 4) NPK.

Etude des formes d'engrais. Généralement, les différences d'action des diverses formes d'engrais ne sont pas grandes, ce qui augmente l'exigence à l'égard de la précision de l'expérience. La comparaison des formes d'un genre d'engrais, azotés par exemple, doit se faire à des doses d'azote égales sur l'arrière-fond de l'apport des deux autres genres d'engrais (c'est-à-dire phosphatés et potassiques) : 1) 0 ; 2) PK (complément minéral) ; 3) complément minéral + nitrate d'ammoniaque ; 4) complément minéral + urée ; 5) complément minéral + ammoniaque anhydre.

Afin de comparer l'efficacité des engrais simples et concentrés (engrais complexes tels que nitrophoska, renfermant de l'azote, du phosphore et du potassium) on peut adopter le schéma suivant : 1) témoin (sans engrais) ; 2) NPK (mélange d'engrais simples, nitrate d'ammoniaque, superphosphate et chlorure de potassium) ; 3) NPK (nitrophoska en doses équivalentes au NPK de la variante 2).

Dans les schémas d'étude de nouvelles formes d'engrais, les engrais pris comme témoins seront donnés en plusieurs doses.

Etude des doses et des proportions d'engrais. L'augmentation des doses d'engrais accroît la récolte jusqu'à une certaine limite. Quand on continue à augmenter les doses, le niveau maximum de récolte se maintient également dans un intervalle déterminé, une augmentation ultérieure de la dose peut même faire baisser la récolte. C'est pourquoi, quand on étudie l'action de différentes doses d'un genre d'engrais sur le complément minéral des deux autres principaux genres, il faut essayer au moins trois doses. La plus petite, au niveau assurant environ la moitié de l'accroissement maximal de récolte ; la moyenne, au niveau nécessaire pour un maximum d'accroissement de récolte ; la plus forte à environ un tiers au-dessus de la précédente. Par exemple, on attend un gain maximal de récolte par apport d'azote avec une dose de 90 kg/ha de N sur un arrière-fond d'engrais phosphatés et potassiques. Le schéma d'étude des doses d'azote pour ce cas pourra être le suivant : 1) 0 ; 2) PK (complément minéral) ; 3) complément minéral + N_{45} ; 4) complément minéral + N_{90} ; 5) complément minéral + N_{120}.

Cependant, l'action de doses croissantes de n'importe quel genre d'engrais sur la récolte dépend de la façon dont la culture est pourvue en autres éléments nutritifs et il est important d'assurer la meilleure proportion entre tous les engrais. Nous donnons ci-dessous un exem-

ple de schéma d'expérience d'étude des doses et des proportions entre les différents genres d'engrais.

1) Témoin sans engrais	5) $N_{60}P_{60}K_{60}$	9) $N_{30}P_{60}K_{60}$
2) $P_{60}K_{60}$	6) $N_{60}P_{30}K_{60}$	10) $N_{90}P_{60}K_{60}$
3) $N_{60}P_{60}$	7) $N_{60}P_{90}K_{60}$	11) $N_{60}P_{60}K_{60}$
4) $N_{60}K_{60}$	8) $N_{60}P_{120}K_{60}$	12) $N_{60}P_{60}K_{120}$

Etude des termes et des procédés d'apport des engrais. Tout changement des termes d'apport des engrais rend ordinairement nécessaire un changement de la façon de les enfouir, ce qui dépend des conditions agrotechniques. Le schéma d'étude des procédés d'épandage d'un engrais minéral complet pourra être le suivant :

Variante d'expérience	Fumure de fond (avant le semis)	Au semis	Fumure d'appoint
1	—	—	—
2	$N_{70}P_{80}K_{80}$		
3	$N_{70}P_{70}K_{80}$	P_{10}	—
4	$N_{40}P_{70}K_{80}$	P_{10}	N_{30}
5	$N_{40}P_{70}K_{50}$	P_{10}	$N_{30}K_{30}$

Dans les expériences en champ plurifactorielles, dans lesquelles les niveaux de chaque facteur sont liés à tous les niveaux des autres facteurs étudiés, le nombre de variantes augmente de beaucoup.

Dans toutes les expériences sur les engrais, l'expérience témoin est effectuée sans engrais. Dans les expériences sur les genres et les doses d'engrais, l'expérience témoin est également une expérience sur les autres engrais sur l'arrière-fond desquels est étudié l'effet de l'engrais investigué. Dans les expériences d'étude des formes d'engrais, l'expérience témoin est également une variante avec la forme d'engrais standard ; quand on étudie les termes et procédés d'apport des engrais, la variante témoin est celle avec un procédé de fumure standard. Dans tous les cas, quand on met au point des schémas d'expérience en champ sur les engrais, il faut strictement observer le principe d'une différence unique.

Programme d'expérience en champ

Le programme de l'expérience en champ doit inclure la description détaillée de tous les termes, conditions et méthodes d'accomplissement des expériences, des observations qui les accompagnent, des calculs et des travaux d'analyse pendant la végétation, de la méthode et des éléments de calcul de la récolte, de l'appréciation de la précision et de la certitude de la récolte, des indices d'exportation d'éléments fertilisants et de la qualité de la récolte, des changements dans le niveau de fertilité des sols.

Une place importante dans le programme revient à la description de tous les procédés agrotechniques utilisés dans l'expérience (appréciation de la fertilité et de l'histoire des sols, prédécesseurs, système de travail des sols, termes et procédés d'accomplissement de tous les travaux agrotechniques, etc.). Outre le programme obligatoire d'observations et d'analyses (observations phénologiques, météorologiques, phytopathologiques, entomologiques; analyses du sol du terrain d'essai avant l'établissement de l'expérience, détermination du volume d'exportation d'azote, de phosphore et de potassium avec la récolte, indices fondamentaux de la qualité de la récolte) il faut planifier aussi l'exécution de travaux accessoires permettant d'éclaircir la nature de l'action du facteur étudié. Ce seront, par exemple, des observations sur la dynamique de la teneur en formes assimilables d'éléments nutritifs dans les expériences sur les engrais, etc.

Le programme de l'expérience doit prévoir le moyen de calculer la récolte (sélectif ou global), la technique de la moisson, la définition de la structure de la récolte, la méthode de choix des épreuves végétales aux fins d'analyse. Le programme comprend aussi la méthode du traitement statistique des données de la récolte, de la biométrie et des données analytiques, ainsi que l'appréciation agro-économique du facteur étudié.

Les expériences de production et le calcul de l'action des engrais dans les conditions d'une exploitation

Les expériences en champ sur les engrais dans les conditions de la production sont effectuées sur de grandes surfaces en utilisant l'agrotechnique et les machines agricoles habituelles de l'exploitation. Les expériences de production doivent se faire en observant toutes les exigences essentielles de l'expérience en champ: caractère typique des conditions naturelles et d'exploitation, principe d'une différence unique, précision et certitude de la documentation. Si les variantes sont en nombre réduit (2-4), la précision requise est obtenue par augmentation de la surface des parcelles. La répétition des expériences de production ne doit pas être inférieure à trois fois, c'est seulement si la surface des parcelles est supérieure à 0,5 ha qu'on peut admettre deux répétitions. Les parcelles de l'expérience de production sont ordinairement disposées suivant toute la longueur ou largeur du champ. La largeur de la parcelle même doit être multiple de l'envergure des épandeurs d'engrais (pas moins de deux passages pour les bandes de protection) et de l'envergure (deux ou plus) de la combinée ou d'un autre mécanisme de moisson. L'appréciation de la récolte ne doit être qu'entièrement mécanisée, elle est effectuée sur les parcelles des expériences de production en fauchant le long de toute la parcelle, c'est-à-dire du champ entier. La surface calculée de la parcelle pour un passage de la combinée sera égale au produit de son envergure par la longueur de la parcelle.

Le programme de l'expérience de production inclut obligatoire-

ment les calculs et les observations qui l'accompagnent, le traitement mathématique des données concernant la récolte, l'appréciation agronomique et économique de l'efficacité de l'engrais.

Les méthodes d'appréciation de l'efficacité économique des engrais dans les conditions de la production sont exposées dans des manuels spéciaux. Le plus souvent, l'appréciation économique des engrais se fait en comparant deux indices, celui des frais de production complémentaires pour l'usage des engrais (prix des engrais, accomplissement de tous les travaux nécessaires à leur emploi, frais de récolte et de traitement de l'accroissement de production) et de la valeur du gain de récolte obtenu (d'après les prix d'achat). La différence exprimée en argent entre la valeur du gain de récolte et les frais de production donne le bénéfice net de l'emploi des engrais; le rapport entre la valeur du gain de récolte et les frais complémentaires exprime à quel point les frais d'engrais sont remboursés.

Pour calculer l'efficacité agronomique et économique des engrais dans les semis de l'exploitation on laisse sans engrais quelques parcelles ou bandes témoins. Pour les cultures semées en plein, la surface de la parcelle non fumée doit être égale au moins à 0,25 ha; pour les cultures sarclées, à 0,1 ha. Le plus commode est de réserver des bandes témoins (pas moins de deux) d'une largeur multiple de l'envergure des épandeurs d'engrais (pas moins de deux passages) le long du champ entier. Avant la moisson, on rétablit les limites des bandes témoins et l'on réserve de chaque côté des bandes analogues sur les semis fumés. Les calculs sur les bandes de cultures céréalières sont faits suivant la méthode en plein ou sélective après avoir fait la moisson sur les bandes des rangées de plantes de protection.

Le calcul des plantes-racines et des tubercules ne se fait que par pesée de la récolte sur toute la surface de la bande prise en compte après l'arrachage sur les rangées de protection (ordinairement deux) sur chacun de ses côtés.

Toute les mesures agrotechniques, les travaux d'entretien des plantes, le calcul de la récolte doivent se faire sur les bandes témoins et le reste du terrain fumé simultanément et par le même procédé. Au cours de la végétation, on observera la croissance et le développement des plantes dont on prendra note dans le journal.

LA MÉTHODE LYSIMÉTRIQUE

Les cases lysimétriques utilisées dans les recherches agrochimiques se distinguent par leur construction et l'arrangement des dispositifs pour étudier la dynamique de l'eau (et des éléments fertilisants dissous) à travers l'épaisseur du sol sous l'influence des précipitations atmosphériques ou du régime d'irrigation et d'arrosage étudié. La couche de sol conservant sa structure naturelle peut varier de 20-25 cm à plusieurs mètres, les plus fréquentes sont les cases lysimétriques pour une épaisseur du sol de 1 mètre. Elles peuvent être construites en béton, briques, métal (fer blanc), plastique.

Les conditions d'exécution des expériences lysimétriques doivent se rapprocher des conditions naturelles existantes. Les cases lysimétriques sont enfouies dans le sol ou sont remplies de sol de façon que le niveau du sol y corresponde à la surface du terrain qui les entoure. La densité du sol dans les cases lysimétriques remplies doit correspondre à la densité naturelle, le remplissage se fait en respectant les horizons génétiques. Les cases lysimétriques doivent être équipées de drains, de conduites d'eau et de récipients pour recueillir les eaux infiltrées dans le sol. Tout cet équipement doit garantir l'authenticité et la continuité nécessaires des observations. Dans les cuves lysimétriques (avec sol en jachère ou cultivé) on doit respecter des conditions proches des conditions naturelles simulées. On assurera un éclairage normal, des façons culturales, la protection des semis contre les endommagements.

Les cases lysimétriques sont installées à proximité des laboratoires afin d'assurer le transport en temps voulu et sans perte de grands volumes d'eaux lysimétriques et leur analyse. Les groupes de cases lysimétriques (à raison de 10 et plus) sont disposés à une petite distance les uns des autres, un pluviomètre est installé à côté pour la mesure des précipitations. Le nombre de cases lysimétriques est fixé par le schéma de l'expérience et le programme des recherches.

LA MÉTHODE DE POT EXPÉRIMENTAL

Dans les recherches agrochimiques « la tâche de la méthode de végétation est de mettre en évidence la nature des processus et d'éclaircir la signification de certains facteurs, avant tout, du rôle de la plante, du sol et des engrais dans les conditions les plus favorables à l'expression de ce rôle » (D. Prianichnikov). Dans les expériences de végétation il est possible d'isoler le facteur étudié et de suivre son action en tenant compte plus rigoureusement et en réglant plus strictement les conditions de croissance et de développement des plantes que dans les expériences en champ. La méthode de végétation est une étape nécessaire des recherches relatives aux problèmes d'alimentation des plantes et d'usage des engrais (mise en évidence du rôle physiologique de certains éléments de l'alimentation des plantes, y compris les oligo-éléments, étude de nouvelles formes d'engrais, action de divers facteurs sur l'efficacité des engrais, etc.). Suivant le but de la recherche, la méthode de végétation peut avoir une importance indépendante ou être le complément d'expériences en champ. La méthode de végétation présente plusieurs modifications (elle se pratique sur cultures en sol, sur sable, sur eau, par la méthode des solutions courantes, de l'alimentation isolée, des cultures stériles) dont le choix est déterminé par les buts de la recherche et le caractère de l'action du facteur étudié. Les principales exigences envers l'expérience en champ, la mise au point du schéma et du programme restent en vigueur pour les expériences de végétation.

Les cultures sur sol

Pour effectuer des expériences de végétation dans les cultures sur sol on n'utilise que l'horizon arable supérieur du sol tamisé à travers un crible à trous de 3 mm. Dans des pots contenant 1 à 10 kg de sol (ordinairement, de 5 à 8 kg, la capacité du pot dépend avant tout des particularités biologiques des plantes étudiées) avec drainage naturel ou artificiel, on maintient des conditions d'humidité optimales (d'habitude, 60 % de la capacité au champ). Les doses moyennes d'engrais en g pour 1 kg de sol sont : azote 0,05-0,02 ; phosphore calculé en P_2O_5, 0,05-0,15 ; potassium calculé en K_2O, 0,05-0,2. C'est beaucoup plus que les doses ordinairement utilisées en champ (le diamètre du pot étant de 20 cm, une dose de 0,5 g d'azote par pot correspond environ à 150 kg/ha) et l'effet de l'engrais dans les expériences de végétation se manifeste plus clairement que dans les expériences en champ. On répète 4 fois les expériences de végétation sur des céréales ; pour les cultures d'une plante par pot, on les répète de 6 à 8 fois. Le choix du sol est dicté par les buts de l'expérience, souvent on utilise, pour les expériences de végétation, le sol pris sur les parcelles d'expériences en champ sur les engrais.

Cultures sur eau et sur sable

Dans les cultures sur eau et sur sable, c'est-à-dire quand les plantes sont cultivées sur solutions nutritives en utilisant des milieux infertiles, sable de quartz pur et eau distilée, on a la possibilité de contrôler rigoureusement l'alimentation des plantes. Ceci permet d'étudier l'influence de la composition et de la concentration de la solution nutritive, de la réaction et du pouvoir tampon du milieu sur la croissance et le développement des plantes, les exigences des cultures envers le régime d'alimentation (taux et proportions de substances nutritives) selon les périodes de croissance et autres questions importantes de l'agrochimie. Les mélanges nutritifs pour les cultures sur eau et sur sable se distinguent par leurs teneurs en éléments nutritifs, les formes de sels minéraux, le caractère et les variations de la réaction du milieu à mesure que les substances nutritives sont consommées par les plantes et autres propriétés. La composition des mélanges nutritifs les plus courants est donnée au tableau 87.

La composition des solutions nutritives d'après les variantes d'expériences en accord avec leurs schémas est réglée en faisant varier les doses, la forme des divers sels et des mélanges en égalisant obligatoirement la composition ionique et les concentrations des solutions de toutes les variantes pour tous les autres éléments d'alimentation, excepté l'élément étudié.

Pour les expériences de cultures sur sable, on se sert aussi de pots, comme pour les cultures sur sol. Les éléments nutritifs (sous forme de solutions ou, pour les sels insolubles, à l'état sec) sont apportés au remplissage des récipients, calculés pour 1 kg de sable.

Tableau 87

Mélanges nutritifs pour les cultures sur eau et sur sable
(en g pour 1 kg d'eau ou 1 kg de sable)

Composition du mélange *	Hellriegel	Knop	Prianichnikov
$Ca(NO_3)_2$ anhydre	0,482	1,0	—
NH_4NO_3	—	—	0,24
KH_2PO_4	0,136	0,25	—
K_2HPO_4	—	—	—
$CaHPO_4 \cdot 2H_2O$	—	—	0,172
$MgSO_4$ anhydre	0,060	0,25	0,060
KCl	0,075	0,12	0,16
$FeCl_3$	0,025	traces	0,025
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	—	—	0,344
pH au début de l'expérience	3,6	5,5	6,5
pH en fin d'expérience	7,0	7,2	5,8

* Les mélanges nutritifs contiennent également un certain assortiment d'oligoéléments (bore, molybdène, cuivre, zinc, manganèse, etc.).

Les expériences de cultures sur eau se font dans des pots à large col d'une capacité de 4 à 8 l, fermés de bouchons à interstices (dans lesquels au moyen de coton sont fixées les jeunes pousses des cultures d'essai, est consolidée la carcasse et où passent les tuyaux pour insuffler les solutions nutritives au moyen d'air, afin d'assurer aux racines un approvisionnement normal en oxygène). Les jeunes pousses sont préalablement cultivées dans des cuvettes sur du sable, de la sciure ou du papier buvard. Au repiquage dans les récipients, les plantes doivent avoir 5 à 7 cm de haut et un système radiculaire de 6 à 7 cm de long. Dans tous les récipients pour les expériences de végétation on cultive le même nombre de plantes; en cas de besoin, on démarre. Les récipients sont engaînés dans deux étuis, celui du dedans sombre et celui du dehors clair, afin de protéger les racines contre la lumière, d'empêcher le surchauffement et d'éviter l'empoussièrement. Dans la période de végétation des cultures sur eau on change complètement 3 ou 4 fois les solutions nutritives dans toutes les variantes de l'expérience. S'il est nécessaire de maintenir stable la réaction du milieu on mesure le pH et l'on rectifie la réaction des mélanges nutritifs par des solutions diluées de NaOH ou HCl.

Afin de maintenir stables durant toute la saison, non seulement la réaction, mais aussi la composition et la concentration des substances nutritives, on recourt à des modifications des cultures sur eau : cultures avec changement fréquent des solutions ou cultures à eau courante (les solutions nutritives coulent sans interruption dans les récipients contenant les plantes à la vitesse de 4 l/jour environ).

L'analyse agrochimique quantitative des plantes, des sols, des engrais repose sur les méthodes d'analyse quantitative de chimie générale. L'assortiment exceptionnellement large des éléments, des composés chimiques minéraux et organiques, gênant souvent leur détermination réciproque, dans la composition des plantes, des sols et des engrais rend extrêmement difficile leur analyse quantitative. On utilise, dans les recherches agrochimiques, toutes les méthodes existantes d'analyse quantitative, mais on a surtout recours, à divers procédés instrumentaux: photométrie, potentiométrie, analyse spectrale, etc.

L'analyse agrochimique des plantes est nécessaire:

— pour apprécier la qualité de la récolte des plantes cultivées et ses variations suivant les conditions de culture, du nombre, l'usage d'engrais;

— pour déterminer l'importance de l'exportation des éléments nutritifs avec la récolte et la marche de leur consommation au cours de la végétation;

— pour faire le diagnostic de l'alimentation des plantes et déterminer leurs besoins d'engrais;

— pour étudier comment les plantes utilisent les éléments nutritifs des engrais.

L'analyse agrochimique des sols a pour but:

— d'établir l'approvisionnement des plantes en éléments nutritifs et, par conséquent, leurs besoins d'engrais;

— d'étudier les propriétés des sols qui déterminent les questions fondamentales de l'usage d'engrais et de l'exécution d'un amendement chimique des sols: pouvoir absorbant, réaction du sol et pouvoir tampon (c'est-à-dire la faculté de résister à un changement de réaction), salinité, etc.;

— d'observer les variations de teneur en substances nutritives du sol et de leur assimilabilité pour les plantes suivant les procédés agrotechniques et la fumure;

— d'étudier les processus d'interaction des engrais avec le sol.

L'analyse agrochimique des engrais est utilisée:

— pour apprécier la qualité des engrais organiques locaux et ses variations suivant les conditions d'accumulation, de stockage et d'emploi;

— pour déterminer le taux de principe actif des engrais minéraux industriels et des amendements, afin de vérifier s'ils correspondent aux standards établis;

— pour déterminer l'assimilabilité des substances nutritives des engrais et pour étudier leurs transformations dans le sol.

L'analyse agrochimique des plantes, des sols, des engrais permet d'étudier l'état du bilan des substances nutritives en agriculture et de contrôler scientifiquement l'alimentation des cultures agricoles par les engrais.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction 5

Les tâches et les méthodes de l'agrochimie 5
Bref aperçu historique sur le développement de l'agrochimie 7
Les engrais, leur production et leur emploi dans l'agriculture soviétique 11

Chapitre premier. Les principes de la nutrition (alimentation) des plantes 16

La composition chimique des plantes et la qualité de la récolte 16
Le rôle de certains éléments dans la vie des plantes et l'exportation des substances nutritives avec la récolte 25
La nutrition (alimentation) des plantes 34
La nutrition (alimentation) aérienne des plantes 34
La nutrition (alimentation) radiculaire des plantes 35
Influence du milieu extérieur sur l'absorption des substances nutritives par la plante 44
Le rôle des micro-organismes dans la nutrition des plantes 46
Attitudes des plantes envers les conditions de nutrition dans les différentes périodes de leur croissance 47

Chapitre 2. **Les propriétés agrochimiques du sol en rapport avec la nutrition des plantes et l'emploi d'engrais** 51

La composition du sol 51
Le pouvoir absorbant du sol 60
Acidité et pouvoir tampon du sol 64

Chapitre 3. **L'amendement chimique des sols** 68

Le chaulage des sols acides 68
Action de la chaux sur le sol et sur le rendement 69
Les engrais calciques 72
Détermination du besoin des sols en chaux et dosage de la chaux 73
Termes et procédés d'apport de la chaux 76
Le plâtrage des sols sodiques 78

Chapitre 4. **Les engrais minéraux** 81

Engrais azotés 83
Le rôle de l'azote. Sa teneur et ses transformations dans le sol . . . 83
Les engrais nitriques 92

Les engrais ammoniacaux et à base de sels d'ammonium 94
L'urée (carbamide) 99
Les engrais phosphatés 100
Le rôle du phosphore et sa teneur dans le sol 100
Le superphosphate 103
Précipité, scories de déphosphoration, thermophosphates, phosphate défluoré 106
La farine de phosphorites 107
Les engrais potassiques 110
L'importance du potassium pour les plantes et sa teneur dans le sol 110
Sels potassiques naturels et déchets industriels 113
Les engrais potassiques industriels 114
La cendre, engrais local potassique, phosphaté et calcique 116
Les engrais complexes 117
Mélanges d'engrais 120
Les oligo-éléments 122

Chapitre 5. **Les engrais organiques** 128

Le fumier 128
La composition du fumier 129
Le stockage du fumier 133
Conservation du lisier 138
Action du fumier sur le sol et les plantes 139
Efficacité du fumier et particularités de son emploi dans les diverses conditions pédoclimatiques 140
Utilisation du lisier 142
Le purin 142
Les fientes de volaille 143
La tourbe 144
Les différentes tourbes et leur caractéristique agrotechnique 145
Utilisation de la tourbe en agriculture 146
Emploi des engrais sur les tourbières asséchées 149
L'engrais vert 150

Chapitre 6. **Les systèmes de fertilisation** 153

Principes essentiels de l'établissement des systèmes de fertilisation . . 154
Conditions pédoclimatiques 154
Particularités de l'alimentation des différentes cultures et caractère des assolements. 156
Association du fumier aux engrais minéraux 159
Choix des doses d'engrais minéraux 160
Propriétés, délais et procédés d'apport des engrais 171

Chapitre 7. **Les particularités de la nutrition et de la fertilisation des cultures en Afrique occidentale** 177

Cultures marchandes 184
Le cacaoyer 184
Le caféier 192
Le palmier à huile 202
Le cocotier 207
L'arachide 208
Le cotonnier 210
Les cultures fruitières 221
Le bananier 221

L'ananas 225
Le manguier 231
Le dattier 232
Les cultures céréalières 232
Le riz 232
Le mil africain 242
L'Eleusine corocana 243
Le sorgho 244
Le maïs 246
Le blé 249
Racines alimentaires à fécule 251
Le manioc 251
L'igname 254
La patate douce 256
Les légumineuses à grain 258

Chapitre 8. Les méthodes de recherche agrochimique 263

L'expérience en champ 264
Genres d'expériences en champ 264
Principales exigences méthodiques dans l'accomplissement d'expériences en champ 266
Choix et préparation du champ d'essai, établissement de l'expérience en champ 267
Schémas d'expériences en champ sur les engrais 270
Programme d'expérience en champ 272
Les expériences de production et le calcul de l'action des engrais dans les conditions d'une exploitation 272
La méthode lysimétrique 274
La méthode de pot expérimental 275
Les cultures sur sol 275
Cultures sur eau et sur sable 276
Méthodes de laboratoire 277

Imprimé en Union Soviétique

УДК 63:54(075.8)—40

П. Смирнов, Э. Муравин, В. Стороженко, Н. Ракипов
Агрохимия

Контрольный редактор О. Смирнов. Редактор С. Барабанова.
Художник А. Шипов. Художественный редактор Б. Юдкин.
Технический редактор Н. Панфилова. Корректор С. Балицкая.

ИБ № 2796

Сдано в набор 05.02.81. Подписано к печати 23.06.81. Формат 60 × 90 1/16.
Бумага типографская № 1. Гарнитура обыкновенная. Печать высокая.
Объем 8,75 бум. л. Усл. печ. л. 17,50. Усл. кр. отт. 17,90. Уч.-изд. л. 21,09.
Изд. № 18 1219. Тираж 3345 экз. Зак. 01254. Цена 2 р. 04 к.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР». Москва, 1-й Рижский пер., 2.

Ордена Трудового Красного Знамени Московская типография № 7
«Искра революции» Союзполиграфпрома Государственного Комитета СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва 103001, Трехпрудный пер., 9.

3802020000
С $\frac{4036-100}{041(01)-81}$ 181, ч. 2.